

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2025.03.009

青砂岩-砂浆组合体三轴压缩力学特性和裂纹 闭合演化规律

王 伟^{1,2}, 庄芸芸^{1,2}, 刘世藩^{1,2}, 段雪雷^{1,2}, 曹亚军^{1,2}, 乐 萍^{1,2}, 钱英杰³

(1. 河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学岩土工程科学研究所, 江苏 南京 210098; 3. 浙江省隧道工程集团有限公司, 浙江 杭州 310005)

摘要: 为了探究隧道施工中不同应力状态和黏结面倾角对青砂岩-砂浆组合体力学特性的影响, 开展了不同围压和倾角下青砂岩-砂浆组合体的三轴压缩试验, 分析了组合体强度、变形特征和破坏形式的演化规律, 同时基于裂纹闭合效应, 构建了组合体裂纹轴向闭合模型, 并对模型的合理性进行了验证。结果表明: 随围压增大, 青砂岩-砂浆组合体屈服特性减弱, 围压对 60° 倾角组合体强度提升最显著; 峰值应变及弹性模量均与围压正相关; 随倾角增大, 峰值强度和黏聚力呈“N”形演化, 60° 倾角组合体峰值强度最小; 高围压下, 组合体除 60° 倾角为沿接触面整体滑移失稳外, 其余倾角组合体呈单一主裂缝贯穿的剪切破坏; 组合体裂纹轴向闭合模型可有效描述峰前轴向应力-应变曲线关系。

关键词: 青砂岩-砂浆组合体; 三轴压缩试验; 裂纹轴向应变; 强度; 变形; 破坏特征

中图分类号: TU45

文献标志码: A

文章编号: 1000-1980(2025)03-0067-09

Mechanical properties and crack closure evolution pattern of caesious sandstone-mortar composites under triaxial compression

WANG Wei^{1,2}, ZHUANG Yunyun^{1,2}, LIU Shifan^{1,2}, DUAN Xuelei^{1,2}, CAO Yajun^{1,2}, LE Ping^{1,2}, QIAN Yingjie³

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Geotechnical Research Institute of Hohai University, Nanjing 210098, China;

3. Zhejiang Tunnel Engineering Group Co., Ltd., Hangzhou 310005, China)

Abstract: To explore the influence of different stress states and angles of inclination of bonding surface on the mechanical properties of caesious sandstone-mortar composites during tunnel construction, triaxial compression tests on caesious sandstone-mortar composites under different angles of inclination and confining pressures were carried out. The evolution patterns of the strength, deformation characteristics, and damage modes of these composites were analyzed. Based on the crack closure effect, an axial crack closure model of the composites was developed, and its rationality was verified. The results show that as the confining pressure increases, the yielding behavior of the caesious sandstone-mortar composites becomes less obvious. In addition, the confining pressure has the greatest effect on improving the strength of the composite with an angle of inclination of 60°. The peak strain and elastic modulus are positively correlated with the confining pressure. As the angle of inclination increases, the peak strength and cohesion change in an “N”-shaped manner. The composite with an angle of inclination of 60° has the lowest peak strength. Under high confining pressure, the composite with an angle of inclination of 60° experiences overall slip instability along the contact surface, but other composites with different angles of inclination undergo shear damage penetrated with a single main crack. The established axial crack closure model of the composites can effectively describe the relationship between the pre-peak axial stress and strain curves.

Key words: caesious sandstone-mortar composite; triaxial compression test; axial crack strain; strength; deformation; damage characteristic

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(12072102); 国家自然科学基金青年科学基金项目(12102129)

作者简介: 王伟(1978—), 男, 教授, 博士, 主要从事多场耦合岩石力学理论与试验研究。E-mail: wwang@hhu.edu.cn

引用本文: 王伟, 庄芸芸, 刘世藩, 等. 青砂岩-砂浆组合体三轴压缩力学特性和裂纹闭合演化规律[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2025, 53(3): 67-75.

WANG Wei, ZHUANG Yunyun, LIU Shifan, et al. Mechanical properties and crack closure evolution pattern of caesious sandstone-mortar composites under triaxial compression[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2025, 53(3): 67-75.

岩石和混凝土这两类材料在土木工程建设中应用广泛,众多大型工程皆由其构成组合体,例如矿用巷道和隧道围岩的支护^[1-2]、大坝坝肩和基岩组成的整体结构^[3-4]、边坡与支护结构^[5]。以隧道工程为例,围岩为天然岩体,衬砌用混凝土,共同构成承载体系保障运营。隧道穿越褶皱地层时,围岩层面倾斜使混凝土与岩石接触面倾角改变。倾角小,竖向荷载分量大,需着重考虑衬砌竖向承载与抗裂性能以防底部开裂;倾角大,侧向推力影响突出,衬砌要有足够侧向支撑力以防侧向变形与垮塌。实际工况中,岩石和混凝土二者相互作用时展现出的力学特性颇为复杂^[6],且在外部荷载持续作用下,极易萌生裂隙,进而对整个工程的安全构成严重威胁,因此针对岩石-混凝土组合体开展力学特性研究,具有重要的现实意义。

目前,岩石-混凝土组合体的研究已取得了显著进展,涉及了多种试验方法、数值模拟技术以及理论模型的开发和应用。试验方法方面,学者们通过单轴压缩试验、三轴压缩试验、剪切试验^[7]、疲劳加载试验^[8]、拉伸试验^[9]、三点弯曲试验^[10]、冲击破坏试验^[11]和冻融循环试验^[12]得到组合体的应力应变曲线形式、强度特性、变形特性与破坏形式等的变化规律,并分析了接触面的损伤扩展。这些试验证明了岩石-混凝土界面对整体结构的强度具有关键作用。数值模拟方面,学者们通过有限元^[13-14]、离散元^[15]等方法,对岩石-混凝土组合体的受力和变形、接触面处的微观破坏过程、裂纹扩展和破坏过程进行了研究。随着损伤力学和断裂力学等理论不断发展,人们提出了许多理论模型用于预测岩石-混凝土组合体相互作用下的力学特性^[16]。Hillerborg 等^[13]提出了虚拟裂纹模型,并得出裂纹尖端前方的断裂加工区中存在作用于虚构裂纹面的内聚应力的结论。Li 等^[17]基于断裂力学理论,建立了砂浆-岩石二元材料的理论冲击模型,讨论了界面倾角和界面形状变化对动态断裂模式的影响。Wang 等^[18]建立了基于应力强度因子的分层砂浆-岩石梁裂缝扩展准则。汪铁楠^[19]通过研究不同界面粗糙度混凝土-花岗岩组合体的力学特性,提出了峰前裂纹演化模型。

上述研究主要侧重于研究岩石和混凝土接触面的粗糙程度对组合体力学特性的影响,但对于不同倾角接触面和应力状态下组合体的材料力学行为和裂纹演化机制的研究还不深入。本文针对四川某隧道工程,通过开展不同接触面倾角(β)下青砂岩-砂浆组合体的三轴压缩试验,研究组合体在三轴压缩下的力学特性和破坏形式,同时针对裂纹闭合效应,推导裂纹轴向闭合模型,并采用青砂岩-砂浆组合体的试验数据对模型的合理性进行验证。

1 试验方法

1.1 试验仪器

试验设备为岩石力学多场耦合试验仪(图 1),由中国科学院武汉岩土力学研究所和河海大学联合研发^[20]。测试系统包括三轴压力室、偏压控制系统、围压控制系统、水/气压控制系统、计算机控制系统和数据采集系统。应变测量系统由轴向线性可变差动变压器和环向应变传感器测量环组成,主要测量试样加载过程中的轴向和环向应变。

1.2 试样制备及试验方案

试验所用青砂岩取自四川某工程现场,表面呈青灰色,为均质细粒结构,岩性完整均一,矿物成分主要为石英、长石等,孔隙率为 10.37%,天然密度为 2.41 g/cm³。选取完整均质岩块,按照标准 SL/T 264—2020《水利水电工程岩石试验规程》、GB/T 50266—2023《工程岩体试验方法标准》和国际岩石力学学会推荐的《岩石力学试验建议方法》,将岩块加工成标准圆柱青砂岩试样,尺寸为 50 mm×100 mm(直径×高)。砂浆主要由标号为 52.5 普通硅酸盐水泥、细砂(10S 标准砂)、水、聚羧酸高性能减水剂(液体)和硅灰等组成^[20]。砂浆各组成的配合比如下:水泥、细砂、水、减水剂、硅灰分别为 1050、525、263、11、84 kg/m³。

试样的制备过程:①砂浆搅拌;②青砂岩-砂浆组合体浇筑、插捣与振捣,根据制备好的不同角度的青砂岩试样和设计的砂浆配合比,采用砂浆直接浇筑在青砂岩表面的方式进行青砂岩-砂浆组合体试样制备;③试样拆模与养护,对青砂岩-砂浆组合体进行拆模及编号,然后将组合体试样放入混凝土标准养护箱内养护 28 d。制备完成的青砂岩-砂浆组合体试样如图 2 所示。

为了分析围压与接触面倾角对组合体强度和变形的影响规律,结合工程实际地应力条件,选取 5、15、

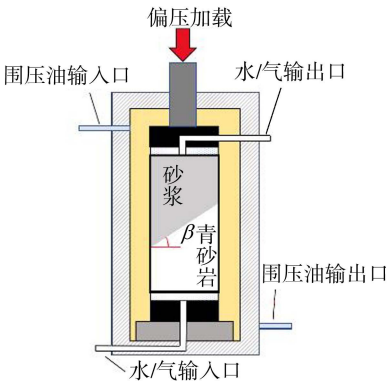


图 1 试验设备示意图
Fig.1 Test equipment

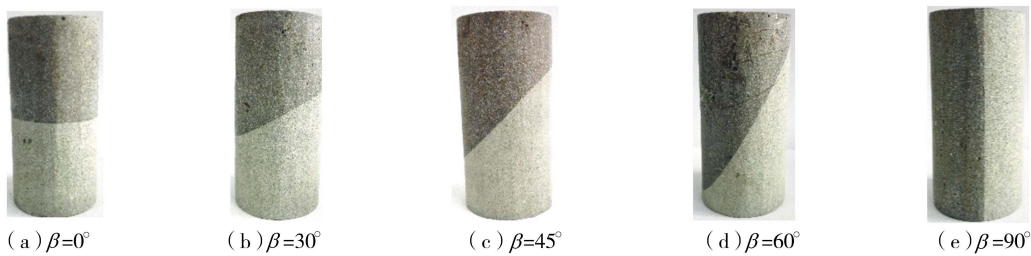


图 2 不同倾角的青砂岩-砂浆组合体试样

Fig. 2 Caesious sandstone-mortar composite samples with different angles of inclination

30 MPa 的围压(σ_3)对不同倾角青砂岩-砂浆组合体进行三轴压缩试验。常规三轴压缩时采用油量加载的方式,轴向加载速率为 1 mL/min;围压加载速率为 3 mL/min,先加围压至预设值,然后采用伺服控制稳定在预设值,轴向加载速率与单轴一致,加载轴压至岩样破坏。

2 三轴压缩试验结果与分析

裂纹体积应变法^[21]常被用来识别岩石内部裂纹的闭合、萌生以及损伤应力阈值。在三轴压缩条件下,岩石的体积应变和裂纹体积应变分别为

$$\varepsilon_v = \varepsilon_1 + 2\varepsilon_3 \tag{1}$$

$$\varepsilon_{v,c} = \varepsilon_v - 2\varepsilon_{v,e} = \varepsilon_v - [(1 - 2\mu)\sigma/E] \tag{2}$$

式中: ε_v 为体积应变; ε_1 、 ε_3 分别为轴向应变和环向应变; $\varepsilon_{v,c}$ 为裂纹体积应变; $\varepsilon_{v,e}$ 为弹性体积应变; μ 、 E 分别为泊松比和弹性模量; σ 为岩石应力。

根据不同围压和倾角下青砂岩-砂浆组合体的偏应力($\sigma_1 - \sigma_3$)与轴向应变、环向应变、体积应变的关系曲线(图 3),统计并计算不同围压和倾角下青砂岩-砂浆组合体的峰值强度、峰值应变和弹性模量等参数,结果见表 1。

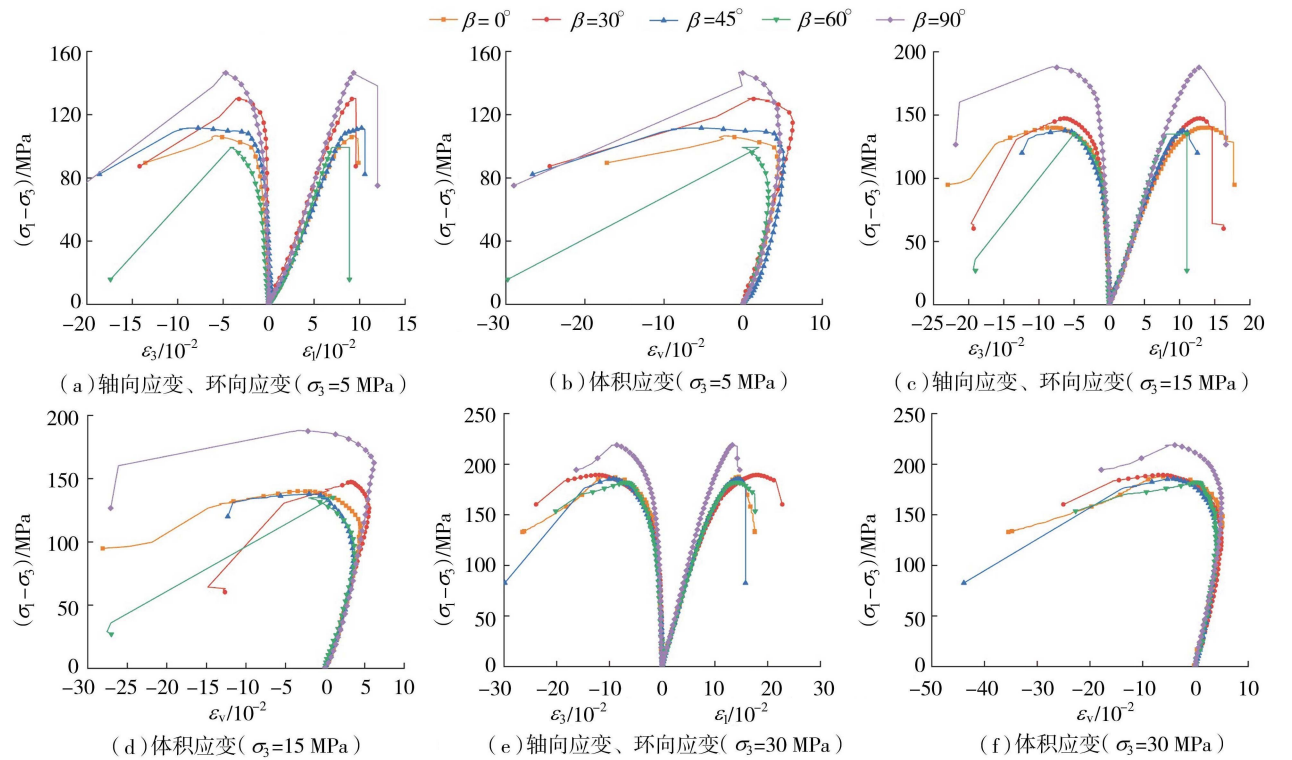


图 3 青砂岩-砂浆组合体偏应力与轴向应变、环向应变、体积应变的关系曲线

Fig. 3 Relationship of deviatoric stress with axial strain, circumferential strain, and volumetric strain of caesious sandstone-mortar composites

表 1 青砂岩-砂浆组合体三轴压缩试验参数

Table 1 Parameters of triaxial compression test of caesious sandstone-mortar composites

试样编号	<i>d</i> /mm	<i>H</i> /mm	σ_c /MPa	$\varepsilon_c/10^{-3}$	σ_{cd} /MPa	<i>E</i> /GPa
ZHT-0°-5	50.64	99.74	106.58	9.49	86.60	15.61
ZHT-0°-15	50.43	100.48	140.03	14.09	115.86	16.29
ZHT-0°-30	50.65	100.12	187.76	14.53	84.98	17.17
ZHT-30°-5	50.02	99.91	130.21	9.27	65.25	16.86
ZHT-30°-15	50.12	100.19	147.31	12.95	101.16	15.92
ZHT-30°-30	50.64	100.36	189.39	17.86	112.68	17.71
ZHT-45°-5	50.46	100.45	111.58	10.12	118.76	15.48
ZHT-45°-15	50.48	100.21	137.77	10.56	88.48	16.62
ZHT-45°-30	50.54	100.87	185.69	14.50	89.35	18.03
ZHT-60°-5	50.90	100.03	99.32	8.89	163.56	17.49
ZHT-60°-15	50.48	100.42	135.02	11.04	138.38	18.78
ZHT-60°-30	50.46	100.40	182.19	14.04	123.71	17.83
ZHT-90°-5	50.02	100.57	146.83	9.49	122.40	19.00
ZHT-90°-15	50.38	100.32	188.07	12.17	122.48	20.37
ZHT-90°-30	49.90	99.90	219.13	13.48	165.44	21.16

注:试样编号 ZHT-0°-5 中 0°为倾角,5 表示围压为 5 MPa;*d* 为直径;*H* 为试样高度; σ_c 为峰值强度; ε_c 为峰值应变; σ_{cd} 为损伤应力。

2.1 应力-应变曲线特征

由图 3 可知,相同倾角不同围压青砂岩-砂浆组合体的偏应力-轴向应变曲线具有良好的规律性:①围压越大,压密阶段越不明显,偏应力-轴向应变曲线越向上迁移。对于屈服阶段,围压越大,青砂岩-砂浆组合体的屈服阶段越明显,且组合体达到峰值强度后并非立即破坏,而是有一段连续的下降过程,说明高围压提高了青砂岩-砂浆组合体的延性,使其由脆性破坏逐渐向塑性破坏转变;②随着围压的增大,峰值强度增大,但峰值强度的增加幅度不断变缓;③随着围压增大,峰值应变增加,说明内部微裂纹被压密程度越大,延性越好。在相同偏应力下,轴向应变差值随围压增大而减小,表明围压对微裂纹压密的影响有限。以 45°倾角组合体为例,当偏应力为 90 MPa 时,围压为 5、15、30 MPa 下的峰值应变分别为 6.78%、5.73%、4.89%,高一级围压与低一级围压的峰值应变差值分别为 1.05%和 0.84%,说明峰值应变降低幅度放缓。当达到偏应力临界值后,围压增加对轴向应变的影响微弱。

相同围压下,不同倾角的青砂岩-砂浆组合体的应力-应变曲线存在差异,主要表现在峰值强度和峰值应变上。由表 1 可知, $\sigma_3=5$ MPa 时 60°倾角组合体的峰值应变最小,原因在于 60°组合体的倾角大,接触面积大,即薄弱区域大,接触面的滑移失稳会先于结构整体破坏。0°、30°、45°倾角组合体因倾角小,接触面小,薄弱区域小,接触面破坏不会先于结构整体破坏,青砂岩和砂浆能够结合成整体,共同受力并协同变形;而对于 90°倾角组合体,因为接触面倾角与围压垂直,围压保护了接触面,使其不容易滑移破坏,青砂岩和砂浆也能够作为一个整体协调受力。

不同围压条件下,各倾角试样的体积应变曲线呈现出相似的变化规律。在应变初始阶段,体积应变为正值,表明材料处于压缩状态。随着应变的持续增加,体积压缩达到最小值,随后体积由压缩转为膨胀。在体积膨胀阶段,曲线的斜率以及变化幅度均发生一定程度的改变,这充分表明围压的持续增加会致使材料的体积应变规律产生较为明显的变化。

2.2 强度特征分析

莫尔-库仑强度准则是岩土工程领域应用最为广泛的强度准则之一,能够很好地描述岩石的强度特征:

$$\sigma_1 = M\sigma_3 + N \tag{3}$$

$$\varphi = \arcsin[(M - 1)/(M + 1)] \tag{4}$$

$$c = N/2\sqrt{M} \tag{5}$$

式中: σ_1 为最大主应力; σ_3 为最小主应力(围压);*M*、*N* 分别为轴向应力与对应围压拟合直线的斜率、截距; φ 、*c* 分别为内摩擦角和黏聚力。

根据直线型莫尔-库仑强度准则,对不同倾角组合体的峰值强度与围压进行拟合,得到各拟合直线的参数(表 2)。由表 2 可知,不同倾角的青砂岩-砂浆组合体的峰值强度均与围压呈正相关关系,即围压越大,峰

值强度越高。峰值强度与围压的拟合方程的拟合系数均大于 0.98,说明莫尔-库仑强度准则可以很好地反映青砂岩-砂浆组合体峰值强度与围压的关系。对比不同倾角青砂岩-砂浆组合体的 M 可知,60°倾角组合体的 M 最大,说明围压对 60°倾角组合体峰值强度的增强程度最高,可能是由于高围压的存在限制了 60°倾角组合体沿着接触面的滑移。三轴压缩下青砂岩-砂浆组合体的黏聚力随着倾角的增大呈现先增大后减小再增大的变化趋势。90°倾角组合体黏聚力最大,60°倾角组合体的最小,原因在于胶结能力较强的接触面在 90°倾角组合体中起到了加强整体性能的特殊作用,而 60°倾角组合体因为大倾角接触面的存在,使得接触面成为整个组合体结构中的薄弱面,组合体的抗剪强度降低,黏聚力降低。对于内摩擦角,随着倾角的增大呈现出先减小再增大又减小的趋势,且 30°倾角组合体的内摩擦角最小,说明倾角对内摩擦角的影响比较明显。

由图 4 可知,青砂岩-砂浆组合体的峰值强度随倾角增大呈“N”形变化。当倾角从 30°增大至 60°时,峰值强度降低,因为接触面为薄弱环节,黏结能力低,倾角越大,组合体越易沿接触面滑移破坏,强度取决于接触面黏结能力。倾角从 60°增大至 90°时,接触面效应消失,90°组合体表现出连续介质特性,峰值强度增大,破坏形式为整体剪切破坏。通过计算各围压下的不同倾角峰值强度与最低峰值强度差值可知,围压越大,不同倾角组合体峰值强度差异性越低,数据的离散性越小,因为高围压下接触面得到加强和保护,倾角对峰值强度的影响减弱。

2.3 破坏模式分析

图 5 为青砂岩-砂浆组合体在不同围压下破坏时的破坏照片和素描图。围压对破坏形式的影响:低围压

表 2 不同倾角下莫尔-库仑强度准则参数

Table 2 Parameters of Mohr-Coulomb strength criterion under different angles of inclination

$\beta/(^{\circ})$	M	N/MPa	R^2	c/MPa	$\varphi/(^{\circ})$
0	4.24	90.76	0.9999	22.04	38.21
30	3.40	115.61	0.9923	31.35	33.07
45	3.98	95.30	0.9984	23.88	36.77
60	4.30	83.82	0.9993	20.21	38.53
90	3.83	137.56	0.9894	35.14	35.89

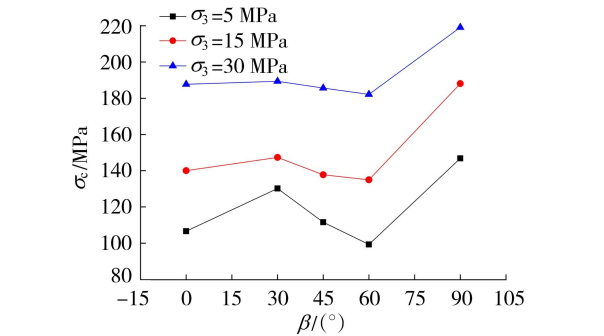


图 4 三轴压缩下青砂岩-砂浆组合体峰值强度与倾角的关系

Fig. 4 Relationship between peak strength and angle of inclination of caesious sandstone-mortar composites under triaxial compression

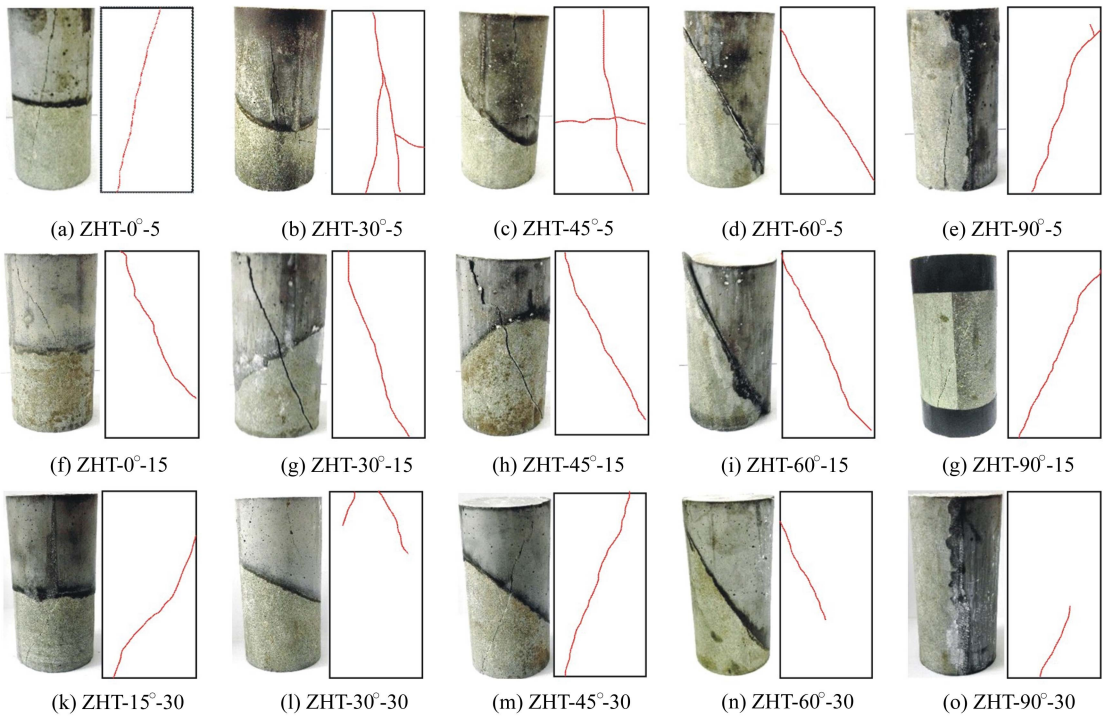


图 5 三轴压缩下青砂岩-砂浆组合体破坏模式

Fig. 5 Damage modes of caesious sandstone-mortar composites under triaxial compression

(5 MPa) 下,组合体主要表现为整体剪切破坏,但伴有少量小裂纹。例如,在 5 MPa 围压下,30°和 45°倾角组合体的破坏由多条小裂纹构成。高围压(15、30 MPa)下,30°和 45°倾角组合体表现为一条宏观贯穿青砂岩和砂浆接触面的主裂缝,说明围压能改变破坏形式。倾角对破坏形式的影响表面为:60°倾角组合体的破坏形式为沿着青砂岩和砂浆接触面的整体滑移失稳破坏,且青砂岩和砂浆介质无裂纹,这是由于其倾角大,接触面积大,薄弱区域大,当薄弱面无法继续承受荷载时,组合体整体首先沿着接触面发生滑移和错动;其余倾角组合体表现为贯穿接触面的主裂缝,体现出整体剪切破坏的特点;而 90°倾角组合体同样为大倾角却未在接触面发生破坏的原因是倾角与围压呈 90°,围压对接触面起到保护作用,与曹吉胜等^[22]的研究结果一致。

3 裂纹轴向闭合模型

3.1 裂纹轴向应变及裂纹轴向演化分析

有效介质理论能较好地定量评价岩石的裂纹闭合效应,该理论认为材料在压缩过程中任一点的轴向应变等于基质轴向应变加上裂纹轴向应变,基质轴向应变与线弹性阶段的弹性模量有关。青砂岩-砂浆组合体的应变可表示为

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_{1,m} + \varepsilon_{1,c} \tag{6}$$

其中

$$\varepsilon_{1,m} = \sigma_1/E$$

式中: $\varepsilon_{1,m}$ 为基质轴向应变; $\varepsilon_{1,c}$ 为裂纹轴向应变。

图 6 中, $\varepsilon_{1,cc}$ 为裂纹轴向闭合应变, $\varepsilon_{1,cf}$ 为裂纹轴向峰值应变, $\sigma_{cc,c}$ 、 $\sigma_{cd,c}$ 、 $\sigma_{cf,c}$ 分别为裂纹轴向闭合应力、裂纹轴向损伤应力、裂纹轴向峰值应力。裂纹轴向应变曲线可分为 3 个阶段:①裂纹压密段($0 \leq \sigma_1 < \sigma_{cc,c}$);②裂纹稳定段($\sigma_{cc,c} \leq \sigma_1 < \sigma_{cd,c}$);③裂纹发展段($\sigma_{cd,c} \leq \sigma_1 \leq \sigma_{cf,c}$)。为了更好地解释式(6),局部放大图 6(a)红框部分,如图 6(b)所示。取宏观轴向应变上的任意一点 A,该点的 $\varepsilon_{1,m}$ 和 $\varepsilon_{1,c}$ 的大小如图 6(b)所示。OB 段为裂纹压密段,点 C 和点 D 分别为裂纹压密段结束对应的 $\varepsilon_{1,cc}$ 和 ε_1 。线段 CB 的斜率为青砂岩-砂浆组合体的弹性模量。

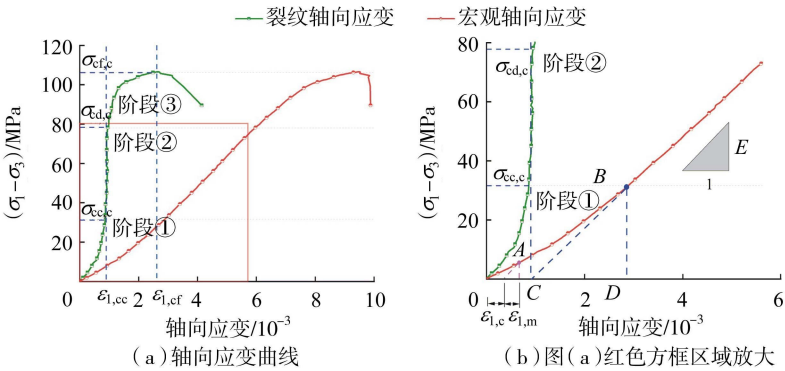


图 6 试样 ZHT-0°-5 的裂纹轴向应变曲线

Fig. 6 Axial crack strain curves of Sample ZHT-0°-5

根据式(6)计算不同倾角青砂岩-砂浆组合体的裂纹轴向应变,为了更好地描述裂纹轴向应变的变化规律,分别绘制裂纹轴向应变-偏应力曲线(图 7)。由图 7 可知,青砂岩-砂浆组合体的轴向应变-偏应力曲线随围压增大而显著变化。当围压较小时(图 7(a)),随着偏应力增大,裂纹轴向应变先缓慢增大、斜率逐渐减小,然后基本稳定,接着缓慢增大、斜率逐渐增大,最后快速增大;曲线的阶段性可分为裂纹压密段、裂纹稳定段和裂纹发展段。随着围压增大(图 7(b)(c)),裂纹压密段的裂纹轴向应变逐渐减小,围压为 30 MPa 时,压密段裂纹轴向应变几乎为零,裂纹压密段几乎消失,这与围压效应一致。

3.2 裂纹轴向闭合模型的构建与验证

岩石力学试验的应变包括工程应变(相对于原始尺寸)和真实应变(相对于真实尺寸),Liu 等^[23]建议变形较大的岩石采用真实应变,变形较小的采用工程应变。岩石的裂纹闭合压密阶段,轴向应变变化较大,因此采用真实应变描述裂纹轴向应变的演化过程。不同应力阶段的有效介质示意图参见文献[19]。

微裂纹和接触面在裂纹闭合压密阶段的真实应变为

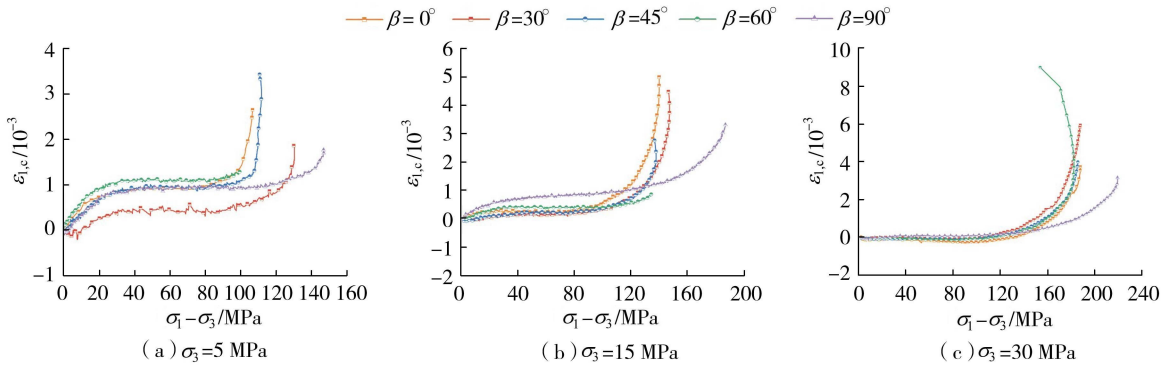


图 7 青砂岩-砂浆组合体的裂纹轴向应变与偏应力关系

Fig. 7 Relationship between axial crack strain and deviatoric stress of caesious sandstone-mortar composites

$$d\varepsilon_{1,c} = -dh_{cc}/h_{cc} \quad (7)$$

式中 h_{cc} 为裂纹和接触面的实时等效高度。根据胡克定律,引入轴向有效应力 $\sigma_\alpha = \sigma_1 - \mu_c(\sigma_2 + \sigma_3)$, 其中 μ_c 为微裂纹和接触面的等效泊松比, σ_2 为第二主应力。

三轴条件下,作用在微裂纹和接触面上的法向应力为

$$d\sigma_1 = E_{cc} d\varepsilon_{1,c} \quad (8)$$

式中 E_{cc} 为微裂纹和接触面的等效弹性模量。

由式(7)(8)积分可得:

$$\sigma_\alpha = -E_{cc} \ln h_{cc} + C \quad (9)$$

式中 C 为待定常数。当 $0 \leq \sigma_1 < \sigma_{cd,c}$ 时,则有初始条件 $\sigma_\alpha = 0$ 、 $h_{cc} = h_{cc,0}$ ($h_{cc,0}$ 为试样在未压缩前的初始高度),因此:

$$C = E_{cc} \ln h_{cc,0} \quad (10)$$

将 C 代入式(9),整理可得:

$$-\Delta = h_{cc} - h_{cc,0} = h_{cc,0} \left\{ \exp \left[-\frac{\sigma_1 - \mu_c(\sigma_2 + \sigma_3)}{E_{cc}} \right] - 1 \right\} \quad (11)$$

式中 Δ 为微裂纹和接触面的等效位移。对式(11)进行变换,则 $\varepsilon_{1,c}$ 与 σ_1 、 σ_2 、 σ_3 关系为

$$\varepsilon_{1,c} = \varepsilon_{1,cc} \left\{ 1 - \exp \left[-\frac{\sigma_1 - \mu_c(\sigma_2 + \sigma_3)}{E_{cc}} \right] \right\} \quad (12)$$

其中

$$\varepsilon_{1,cc} = h_{cc,0}/H$$

同理,当 $\sigma_{cd,c} \leq \sigma_1 \leq \sigma_{cf,c}$ 时,

$$\varepsilon_{1,c} = \varepsilon_{cc,0} \left[\exp \left(-\frac{\sigma_1 - \sigma_{cd,c}}{E_{cd}} \right) - 1 \right] + \varepsilon_{1,cc} \quad (13)$$

式中: $\varepsilon_{cc,0}$ 为裂纹初始损伤应变; E_{cd} 为该阶段下的裂纹等效弹性模量,通过室内力学曲线参数反演得到。

综上,裂纹轴向闭合演化模型为

$$\varepsilon_{1,c} = \begin{cases} \varepsilon_{1,cc} \left\{ 1 - \exp \left[-\frac{\sigma_1 - \mu_c(\sigma_2 + \sigma_3)}{E_{cc}} \right] \right\} & 0 \leq \sigma_1 < \sigma_{cd,c} \\ \varepsilon_{cc,0} \left[\exp \left(-\frac{\sigma_1 - \sigma_{cd,c}}{E_{cd}} \right) - 1 \right] + \varepsilon_{1,cc} & \sigma_{cd,c} \leq \sigma_1 \leq \sigma_{cf,c} \end{cases} \quad (14)$$

为更好地描述裂纹损伤与 $\varepsilon_{1,c}$ 的关系,引入损伤参数 D ,建立关系式:

$$D = \begin{cases} \frac{D_0 - D_c}{\varepsilon_{1,cc}^2} \varepsilon_c^2 + \frac{2\varepsilon_{1,cc}(D_c - D_0)}{\varepsilon_{1,cc}^2} \varepsilon_c + D_0 & 0 \leq \varepsilon_{1,c} < \varepsilon_{1,cc} \\ \frac{(D_f - D_c)(\varepsilon_c - \varepsilon_{1,cc})^2}{(\varepsilon_{1,cf} - \varepsilon_{1,cc})^2} + D_c & \varepsilon_{1,cc} \leq \varepsilon_{1,c} \leq \varepsilon_{1,cf} \end{cases} \quad (15)$$

其中

$$\varepsilon_{1,cf} = h_{f,cc}/H$$

式中: D_0 为初始损伤; D_c 为裂纹压密段结束时残余损伤; D_f 为裂纹峰值应变对应的损伤。

以 $\sigma_3 = 15\text{ MPa}$ 下青砂岩-砂浆组合体为例,采用式 (14) 对裂纹轴向应变进行拟合,并根据式 (15) 计算 D ,拟合结果和损伤参数计算结果如图 8 所示。由于裂纹轴向闭合模型为分段函数,因此存在两个拟合参数,分别记为 $R_1^2(0 \leq \sigma_1 < \sigma_{cc,e})$ 和 $R_2^2(\sigma_{cc,e} \leq \sigma_1 \leq \sigma_{cf,e})$,各拟合参数见表 3。

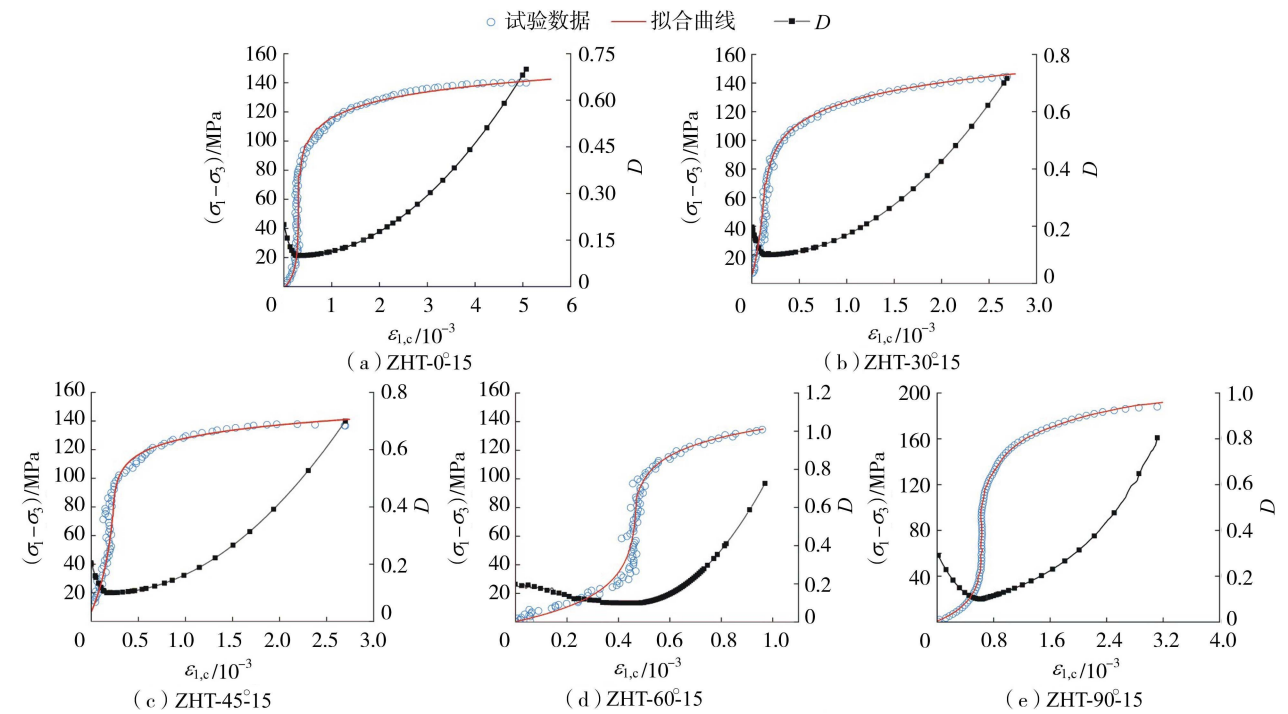


图 8 青砂岩-砂浆组合体裂纹轴向应变拟合曲线及损伤曲线

Fig. 8 Axial crack strain fitting curve and damage curve of caesious sandstone-mortar composites

由图 8 和表 3 可知,裂纹轴向闭合模型能够较好地描述青砂岩-砂浆组合体压密过程中的微裂纹和接触面裂纹演化。各青砂岩-砂浆组合体分段函数的 R^2 均大于 0.94,拟合效果较好,验证了裂纹轴向闭合模型的可靠性。损伤曲线能够较好地描述裂纹的损伤状态与裂纹轴向应变的关系:初始状态下,裂纹存在初始损伤,随着裂纹被压密,损伤开始减小,当裂纹应力达到闭合应变, D 达到最小;当裂纹轴向应变超过闭合应变后,损伤开始增大,损伤变化速率加快;当裂纹轴向应变达到峰值后, D 也达到峰值。

表 3 裂纹轴向闭合模型拟合参数

Table 3 Fitting parameters of axial crack closure models

试样编号	$\varepsilon_{1,cc}/10^{-3}$	$\sigma_{cc,e}/\text{MPa}$	$\sigma_{cf,e}/\text{MPa}$	R_1^2	R_2^2
ZHT-0°-15	0.278	48.326	140.025	0.981	0.987
ZHT-30°-15	0.512	36.305	147.298	0.985	0.997
ZHT-45°-15	0.180	42.825	137.772	0.979	0.991
ZHT-60°-15	0.460	42.811	135.019	0.951	0.992
ZHT-90°-15	0.629	95.711	188.035	0.991	0.998

4 结 论

- a. 相同围压下,60°倾角青砂岩-砂浆组合体最先呈现裂纹闭合状态和应力屈服,组合体峰值强度随倾角呈“N”形演化,60°倾角时峰值强度最小;随倾角增大,黏聚力先增大后减小再增大。组合体的峰值强度、峰值应变、弹性模量与围压呈线性正相关关系,围压对 60°倾角组合体强度提升显著。
- b. 低围压下试样的破坏模式主要为以剪切破坏为主、拉伸破坏为辅的混合破坏模式;高围压下,裂纹数量较少,呈单一主裂缝贯穿的剪切破坏。不同围压下 60°倾角组合体均呈现为沿接触面的整体滑移破坏。
- c. 建立的裂纹轴向闭合模型能够准确描述峰前应力-应变曲线,尤其能精准刻画压密段非线性特征,同时损伤曲线能够有效表征裂纹损伤状态与轴向应变关系。

参考文献:

[1] MENG Qingbin,HAN Lijun,QIAO Weiguo,et al. Support technology for mine roadways in extreme weakly cemented strata and its application[J]. International Journal of Mining Science and Technology,2014,24(2):157-164.

[2] 王义盛,赵小鹏,袁锐,等. 风化岩层岩渣配制的盾构同步注浆浆液性能及微观形貌分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(4):65-71. (WANG Yisheng,ZHAO Xiaopeng,YUAN Rui,et al. Analysis on performance and micro morphology of shield synchronous grouting slurry made of weathered rock slag[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2023,51(4):65-71. (in Chinese))

[3] 朱瑞恒,岑威钧,薛阳,等. 坝基廊道开裂对心墙坝渗流特性的影响[J]. 河海大学学报(自然科学版),2024,52(4):22-28. (ZHU Ruiheng,CEN Weijun,XUE Yang,et al. Influence analysis of dam foundation gallery cracks on seepage characteristics of core dam[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2024,52(4):22-28. (in Chinese))

[4] 王相烜,刘得潭,何传凯,等. 长河坝水电站特高心墙堆石坝双防渗墙渗流控制特性反演分析[J]. 水利水电科技进展,2023,43(5):88-93. (WANG Xiangxuan,LIU Detan,HE Chuankai,et al. Inversion analysis on seepage control characteristics of double cut-off walls for the extra-high core rockfill dam at Changheba Hydropower Station [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2023,43(5):88-93. (in Chinese))

[5] 徐卫亚,陈世壮,张贵科,等. 基于 PSO-LSSVM-BP 模型的高边坡力学参数反分析及稳定性评价[J]. 河海大学学报(自然科学版),2024,52(5):52-59. (XU Weiya,CHEN Shizhuang,ZHANG Guike,et al. Inverse analysis of mechanical parameters of high slope based on PSO-LSSVM-BP model and stability evaluation[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2024,52(5):52-59. (in Chinese))

[6] 谢和平,陈忠辉,周宏伟,等. 基于工程体与地质体相互作用的两体力学模型初探[J]. 岩石力学与工程学报,2005,24(9):1457-1464. (XIE Heping, CHEN Zhonghui, ZHOU Hongwei, et al. Study on two-body mechanical model based on interaction between structural body and geo-body [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2005,24(9):1457-1464. (in Chinese))

[7] JIANG Quan,YANG Yao,YAN Fei,et al. Deformation and failure behaviours of rock-concrete interfaces with natural morphology under shear testing[J]. Construction and Building Materials,2021,293:123468.

[8] GENG Yan,YUAN Wenyan,RONG Hua,et al. Investigation on fracture properties and FPZ evolution of concrete/rock bi-material interface after low-level fatigue loading[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics,2024,132:104479.

[9] SHAMS G, RIVARD P, MORADIAN O. Tensile strength and failure behavior of rock-mortar interfaces: Direct and indirect measurements[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering,2024,16(1):41-55.

[10] YANG Wenyan,DONG Wei,ZHANG Binsheng,et al. Investigations on fracture properties and analytical solutions of fracture parameters at rock-concrete interface[J]. Construction and Building Materials,2021,300:124040.

[11] HAN Zhenyu,LI Diyu,LI Xibing. Dynamic mechanical properties and wave propagation of composite rock-mortar specimens based on SHPB tests[J]. International Journal of Mining Science and Technology,2022,32(4):793-806.

[12] 申艳军,魏欣,杨更社,等. 岩石-混凝土界面黏结强度冻融劣化模型及试验分析[J]. 岩石力学与工程学报,2020,39(3):480-490. (SHEN Yanjun,WEI Xin,YANG Gengshe,et al. Freeze-thaw deterioration model and experimental analysis of rock-concrete interface bond strength [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2020,39(3):480-490. (in Chinese))

[13] HILLERBORG A,MODÉER M,PETERSSON P E. Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements[J]. Cement and Concrete Research,1976,6(6):773-781.

[14] XU Lei,JIANG Lei,HUANG Yefei,et al. An efficient approach for mesoscale fracture modeling of fully-graded hydraulic concrete[J]. Water Science and Engineering,2022,5(4):337-347.

[15] GUTIÉRREZ-CH J G,SENET S,MELENTIJEVIC S,et al. Distinct element method simulations of rock-concrete interfaces under different boundary conditions[J]. Engineering Geology,2018,240:123-139.

[16] 陈张华,朱其志,吕超洋,等. 蟠龙抽水蓄能电站洞室围岩三轴试验及本构模型[J]. 河海大学学报(自然科学版),2022,50(5):105-110. (CHEN Zhanghua,ZHU Qizhi,LYU Chaoyang,et al. Triaxial compression test and constitutive model of surrounding rock of tunnels in Panlong Pumped-Storage Power Station [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2022,50(5):105-110. (in Chinese))

[17] LI Zhaoqi,DONG Jie,JIANG Tao,et al. Experimental study on the dynamic fracture characteristics of mortar-rock interface zones with different interface inclinations and shapes[J]. Materials,2023,16(15):5475.

modified UH model[J]. Rock and Soil Mechanics,2024,45(4):1233-1241. (in Chinese))

[21] 张金利,袁满,蒋正国,等. 纤维红黏土三轴试验与数值分析[J]. 人民长江,2013,44(19):64-68. (ZHANG Jinli,YUAN Man,JIANG Zhengguo, et al. Triaxial test and numerical analysis on fiber reinforced laterite clay[J]. Yangtze River,2013,44(19):64-68. (in Chinese))

[22] 陈志昊,刘瑾,钱卫,等. 高分子固化剂/纤维改良砂土的抗拉强度试验研究[J]. 工程地质学报,2019,27(2):350-359. (CHEN Zhihao,LIU Jin,QIAN Wei, et al. Experimental study on tensile strength of polymer curing agent/fiber modified sand [J]. Journal of Engineering Geology,2019,27(2):350-359. (in Chinese))

[23] 郭青林,李平,张博,等. 微纳米 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 加固遗址土室内试验研究[J]. 岩土力学,2023,44(8):2221-2228. (GUO Qinglin,LI Ping,ZHANG Bo, et al. Laboratory test of micro-nano $\text{Ca}(\text{OH})_2$ reinforced earthen sites[J]. Rock and Soil Mechanics,2023,44(8):2221-2228. (in Chinese))

[24] 陈永辉,赵维炳,汪志强. 一个加筋复合土体的本构关系[J]. 水利学报,2002,33(12):26-32. (CEHN Yonghui,ZHAO Weibing,WANG Zhiqiang. The constitutive relationship of reinforced soil[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2002,33(12):26-32. (in Chinese))

[25] 卢浩,晏长根,贾卓龙,等. 聚丙烯纤维加筋黄土的抗剪强度和崩解特性[J]. 交通运输工程学报,2021,21(2):82-92. (LU Hao,YAN Changgen,JIA Zhuolong, et al. Shear strength and disintegration properties of polypropylene fiber-reinforced loess[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering,2021,21(2):82-92. (in Chinese))

[26] 马晓凡,陈红,刘瑾,等. CT 扫描视域下黏土干湿循环劣化机理[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(5):111-118. (MA Xiaofan,CHEN Hong,LIU Jin, et al. Deterioration mechanism of clay in dry-wet cycle under CT scanning[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2023,51(5):111-118. (in Chinese))

[27] 贾卓龙,晏长根,包含,等. 生物胶-纤维固化黄土的三轴剪切特性研究[J]. 中国公路学报,2024,37(6):122-131. (JIA Zhuolong,YAN Changgen,BAO Han, et al. Triaxial shear characteristics of biological gum-fiber-reinforced loess [J]. China Journal of Highway and Transport,2024,37(6):122-131. (in Chinese))

[28] 杨万里,石玉玲,穆鹏雪,等. 瓜尔豆胶固化黄土的工程特性及抗冲蚀试验研究[J]. 水文地质工程地质,2022,49(4):117-124. (YANG Wanli,SHI Yuling,MU Pengxue, et al. An experimental study of the engineering properties and erosion resistance of guar gum-reinforced loess[J]. Hydrogeology and Engineering Geology,2022,49(4):117-124. (in Chinese))

[29] 王德银,唐朝生,李建,等. 纤维加筋非饱和黏性土的剪切强度特性[J]. 岩土工程学报,2013,35(10):1933-1940. (WANG Deyin,TANG Chaosheng,LI Jian, et al. Shear strength characteristics of fiber-reinforced unsaturated cohesive soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2013,35(10):1933-1940. (in Chinese))

(收稿日期:2024-06-05 编辑:刘晓艳)

+++++
(上接第 75 页)

[18] WANG Hongwei,WU Zhimin,WANG Yanjie, et al. Investigation on crack propagation perpendicular to mortar-rock interface: experimental and numerical[J]. International Journal of Fracture,2020,226(1):45-69.

[19] 汪铁楠. 不同界面粗糙度混凝土:花岗岩组合体的压缩力学性能及峰前裂纹演化模型研究[D]. 西安:长安大学,2023.

[20] 王伟,张宽,梅胜尧,等. 不排气条件下低渗透岩石力学特性试验[J]. 河海大学学报(自然科学版),2022,50(3):110-117. (WANG Wei,ZHANG Kuan,MEI Shengyao, et al. Experimental study on mechanical characteristics of low permeability rock under gas undrained condition[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2022,50(3):110-117. (in Chinese))

[21] 李地元,陈昱达. 单轴压缩下岩石裂纹扩展应力阈值识别与验证[J]. 岩石力学与工程学报,2023,42(增刊1):3121-3130. (LI Diyuan,CHEN Yuda. Identification and verification of stress threshold for rock crack propagation under uniaxial compression [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2023,42(Sup1):3121-3130. (in Chinese))

[22] 曹吉胜,戴前伟,周岩,等. 考虑界面倾角及分形特性的组合煤岩体强度及破坏机制分析[J]. 中南大学学报(自然科学版),2018,49(1):175-182. (CAO Jisheng,DAI Qianwei,ZHOU Yan, et al. Failure mechanism and strength of coal-rock combination bodies considering dip angles and fractal characteristics of interface [J]. Journal of Central South University (Science and Technology),2018,49(1):175-182. (in Chinese))

[23] LIU H H,RUTQVIST J,BERRYMAN J G. On the relationship between stress and elastic strain for porous and fractured rock[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences,2009,46(2):289-296.

(收稿日期:2024-10-21 编辑:刘晓艳)