

干湿状态对红层软岩脆延特性影响的试验研究

吕龙龙¹, 廖红建¹, 伏映鹏¹, 邓博团²

(1. 西安交通大学土木工程系, 710049, 西安; 2. 西安科技大学建筑与土木工程学院, 710054, 西安)

摘要: 为研究含水状态对脆延转化特性的影响, 针对工程性质特殊的胡麻岭隧道红层软岩展开了系列试验, 探究了干燥与天然含水状态试样脆延性区的强度变形规律。首先对干湿组红层软岩分别进行不同围压下的常规三轴压缩试验, 进一步引入脆性指标对岩样脆性程度进行定量表征, 并基于 Mohr-Coulomb 强度准则以及考虑结构强度的初始屈服面模型对各特征应力进行了分析。在此基础上通过试验, 从宏观尺度上探究了红层软岩脆延转化机理。研究表明: 岩样干燥后, 峰值强度增加了 93.39%~145.35%, 残余强度增加了 77.83%~133.72%, 脆延转化压力增加近 40%, 峰值应变降低了 24.13%~88.92%; 延性区的干湿试样的黏聚力近似为脆性区的 1.8 倍, 但内摩擦角均小于脆性区, 为脆性区的 50.4%~90.5%; 同时发现延性区试样在施加围压时已经进入了弹塑性变形阶段, 且脆延转化压力等于等向固结压力。该研究内容可进一步丰富红层软岩的工程特性, 并为穿越红层软岩地下工程的开挖支护提供理论依据。

关键词: 红层软岩; 脆延转化压力; 干湿状态; 脆性指标; 初始屈服面

中图分类号: TU452 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202104018 **文章编号:** 0253-987X(2021)04-0162-10



OSID 码

Experimental Research on Effects of Dry and Natural States on Brittle-Ductile Transition Property for Red-Bed Soft Rock

LÜ Longlong¹, LIAO Hongjian¹, FU Yingpeng¹, DENG Botuan²

(1. Department of Civil Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. School of Architecture and Civil Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

Abstract: To understand the influence of rock water content on the brittle-ductile transition (BDT) property, a series of tests were carried out on Humaling red-bed soft rock with special engineering properties to explore the strength and deformation laws of dry and natural rock samples. The triaxial tests for the dry and natural red-bed soft rock were conducted, the brittleness index was then introduced to characterize the brittle degree of rock samples quantitatively. Following Mohr-Coulomb strength criterion and initial yield surface model considering structural strength, the characteristic stress was analyzed and the BDT mechanism was explored in macroscopic and microscopic scales. Compared to the natural sample, the results show that the peak strength of dry sample increases by 93.39%—145.35%, the residual strength increases by 77.83%—133.72%, the BDT pressure increases by nearly 40%, however, the peak strain decreases by 24.13%—88.92%. Furthermore, the cohesion of the samples in ductile zone is 1.8 times that in brittle zone, but the friction angle in ductile zone is only 50.4%—90.5% of

the brittle zone. The samples in ductile zone enter the elastic-plastic deformation stage under isotropic compression, and the BDT pressure equals to the isotropic consolidation pressure. This approach can further enrich the engineering properties of red-bed soft rock, and provide theoretical basis for excavation and support of red-bed soft rock in underground engineering.

Keywords: red-bed soft rock; brittle-ductile transition pressure; dry and natural state; brittleness index; initial yield surface

红层软岩是一种极其特殊的软岩,在我国分布广泛,可达 $82\times 10^4\text{ km}^2$ 。该类软岩主要由新生界、中生界的土体沉积形成,因含有 Fe^{3+} 而呈现红、深红、褐色,富含黏土矿物成分,遇水易软化,失水易崩解,露天风化迅速,具有一定的流变性和膨胀性,工程性质极差。随着工程进一步向红层地区建设,红层工程病害频发,如路基、库岸边坡变形破坏^[1-2]、隧道大变形^[3]、滑坡^[4]等,给国民经济带来了巨大的损失。2018 年,China Rock 中国岩石协会正式将该类软岩从软岩分会分离出来,并举办了第一届红层软岩分会,进一步表明红层软岩的特殊性以及重要的研究价值。针对该类软岩的特殊性,众多学者已对其变形与力学特性进行了深入研究。文献[1]对红层软岩进行了压缩与流变试验,建立了考虑结构面闭合变形的流变本构模型,并分析了水对岩体变形特征的影响。钟志彬等通过吸水膨胀性试验以及不同水理条件下的蠕变性试验,建立了红层软岩地基时效性的分层变形机制模型,并揭示了红层软岩地区深挖路堑路基持续上拱的变形机制^[5]。文献[2]对不同干湿循环下的红层软岩进行了单轴、三轴压缩试验,探究了红层软岩水-岩作用下力学性质劣化的规律。但是,现阶段对红层软岩的研究大多仅限于脆性区,极少研究其延性区的特性。

低围压下岩石发生单斜面剪切,仅剪切带区域内的晶体边界发生断裂,随即贯通形成宏观滑裂面,岩样表现为脆性破坏。随着围压增加,晶体开始相互滑移,岩石的破坏形式会由脆性向延性转换,临界围压称为脆-延转化(BDT)压力,该压力与岩石的自身物理力学性质相关^[6]。地下原位岩体长期处于三向应力状态,地下工程开挖后,原位应力解除,岩体延性减弱,脆性加强,极易发生岩爆等脆性破坏,所以研究围岩的脆延特性对大理深地下工程开挖、支护具有重要的工程意义^[7-8]。开挖支护过程中,围岩含水状态会发生改变,但现有学者对 BDT 压力影响的研究仅限于温度^[6,9]与应力路径^[10]等因素,很少考虑含水状态的影响。

现阶段已建成的成渝客运专线、西成高铁、成贵

高铁,在建的川南城际铁路、渝昆高铁,以及即将开工建设的成自高铁、成达万高铁等,均不同程度地穿越红层软岩地层^[5]。基于该类软岩的水敏性,不同含水状态下红层软岩的脆延特性亟需研究。

本文通过对干湿状态下胡麻岭红层软岩进行不同围压下的三轴压缩试验,系统地分析其在干湿状态下的破坏特征、应力-应变关系、脆-延转换特性,并探究了各特征应力的强度参数规律及脆-延转化机理。本文研究可进一步丰富红层软岩的工程特性,并为穿越红层软岩地下工程的开挖支护提供理论依据。

1 试验及结果

1.1 试验材料

试验所用红层软岩取自甘肃省胡麻岭隧道,取样埋深约 220 m,主要形成于上新统 N_2 时期,为泥质结构黏土岩。通过 XRD 试验(各测量数据均为质量分数),测得该类红层软岩黏土矿物质量分数为 40%~42%(其中蒙脱石为 21%~23%,伊利石为 11%~13%,高岭石为 6%~8%),石英矿物为 37%~40%,方解石矿物为 16%~19%,硫铁矿物为 4%~5%,其他矿物成分总质量分数小于 1%。该类软岩的物理力学参数见表 1。软岩密封后运送回实验室,制备成 $\Phi 50\text{ mm}\times 100\text{ mm}$ 的标准圆柱试样,试样制备方法参见文献[11],为防止试样含水率的损失,试样制备完成每个阶段,需要立即用保鲜膜将试样包裹严密。同时为避免沉积作用的各向异性对试

表 1 试验用软岩物理力学参数
Table 1 Properties of experimental material

参数	范围
初始孔隙比 e_0	0.196~0.217
颗粒相对密度 d_s	2.639~2.643
天然含水率(质量分数) $w/\%$	7.61~8.10
崩解系数 $I_d/\%$	71.59~74.81
单轴抗压强度 σ_c/MPa	10.20~14.16
巴西劈裂抗拉强度 σ_t/MPa	0.45~0.63
岩样纵波波速 $v_w/(\text{km}\cdot\text{s}^{-1})$	2.59~2.71

验结果的影响,试样钻取方向垂直于岩样层理方向,并利用岩样的纵波波速严格选择,剔除离散性较大的试样^[12]。

1.2 试验设备与方法

试验用仪器为 MTS815 电液伺服刚性试验机,该试验机可提供最大竖向压力为 4 600 kN,最大围压为 150 MPa,应变率控制范围为 $10^{-7} \sim 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ 。环向位移与轴向位移分别采用链式环向引伸计(CEE)与直线引伸计(LVDT)采集。

由于红层软岩对水极其敏感,无法有效控制试样含水率,本文仅对天然含水与干燥状态的试样进行了研究。将制备好的试样分为:天然组(保持天然含水状态),试样编号为 $N_1 \sim N_{18}$;干燥组(烘箱烘干),试样编号为 $D_1 \sim D_{18}$ 。为保证岩样内部结合水全部排出,烘箱温度设置为 107°C ,烘干时间为 24 h。围压 σ_3 依照等比数列选用,分别为 0、2、4、8、16 MPa。为确定红层软岩干湿状态下的脆-延转化压力,添加围压 6 MPa 组。每个状态同一围压条件下试样至少 3 个,若 3 个试样结果差异较大,进行试样加做。为获得软岩的应力-应变关系曲线,本文采用控制应变率式加载,选用 10^{-3} s^{-1} 的应变率。

1.3 试验结果

干湿状态下岩样典型破坏形态及偏应力-应变关系见图 1,其中 $\sigma_1 - \sigma_3$ 为偏应力, ϵ_x, ϵ_y 为横向应变, ϵ_z 为轴向应变。随着围压增加,试样逐渐由张拉破坏转变为剪切破坏,直至横向膨胀不再发生破坏。张拉破坏时,干燥组试样破碎程度远高于天然组。剪切破坏时,天然组破坏面法线与荷载轴线夹角 β 为 $47^\circ \sim 52^\circ$,干燥组的 β 为 $54^\circ \sim 60^\circ$ 。不破坏时,天然组的横向膨胀更明显于干燥组。

干湿组红层软岩的应力-应变关系变化趋势基本一致,即随着围压的增加,峰值强度、残余强度、峰值轴应变值不断增加,应力-应变曲线逐渐由软化向硬化过渡,与硬质岩^[13]脆-延转化特征一致。两组试验对比发现,干燥组同一围压下的试验数据离散性更大。相同围压条件下,天然岩样峰值强度、残余强度均小于干燥组,峰值强度增加了 $93.39\% \sim 145.35\%$,残余强度增加了 $77.83\% \sim 133.72\%$;而天然岩样的峰值轴应变值均大于干燥组,峰值轴应变值降低了 $24.13\% \sim 88.92\%$ 。

对两组应力-应变曲线弹性变形阶段进行线性回归,获取不同围压下试样的弹性模量 E_{av} (对于不存在弹性变形阶段的试样,以初始切线模量为弹性模量),见图 2。天然组岩样的弹性模量为 $0.94 \sim$

3.62 GPa ;干燥组岩样的弹性模量为 $2.81 \sim 5.02 \text{ GPa}$ 。相同围压下,干燥组每个围压下试样的弹性模量平均值都大于天然组,增加了 $26.89\% \sim 191.68\%$ 。由趋势线可以得出,随着围压的增加,除天然组围压在 $4 \sim 6 \text{ MPa}$ 之间与干燥组围压在 $6 \sim 8 \text{ MPa}$ 之间以外(该现象的原因见本文后续分析),弹性模量均在增加。这主要是由于随围压的增加会使软岩内部的空隙闭合,岩样抵抗变形能力增强^[14]。

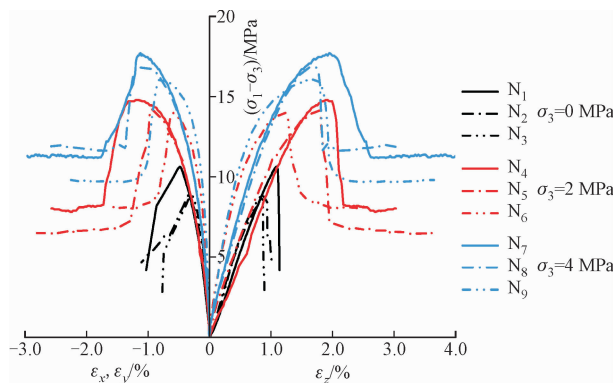
试样干燥后,结合水消失,颗粒矿物之间的水胶



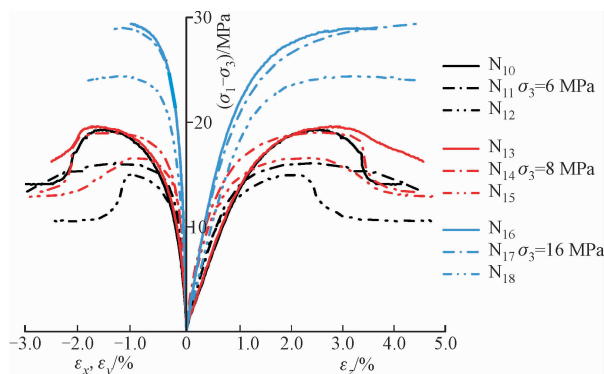
(a) 天然组
0 MPa

(b) 天然组
8 MPa

(c) 天然组
16 MPa



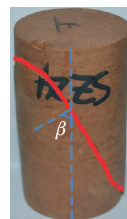
(d) 天然组脆性区



(e) 天然组延性区



(f) 干燥组
0 MPa



(g) 干燥组
8 MPa



(h) 干燥组
16 MPa

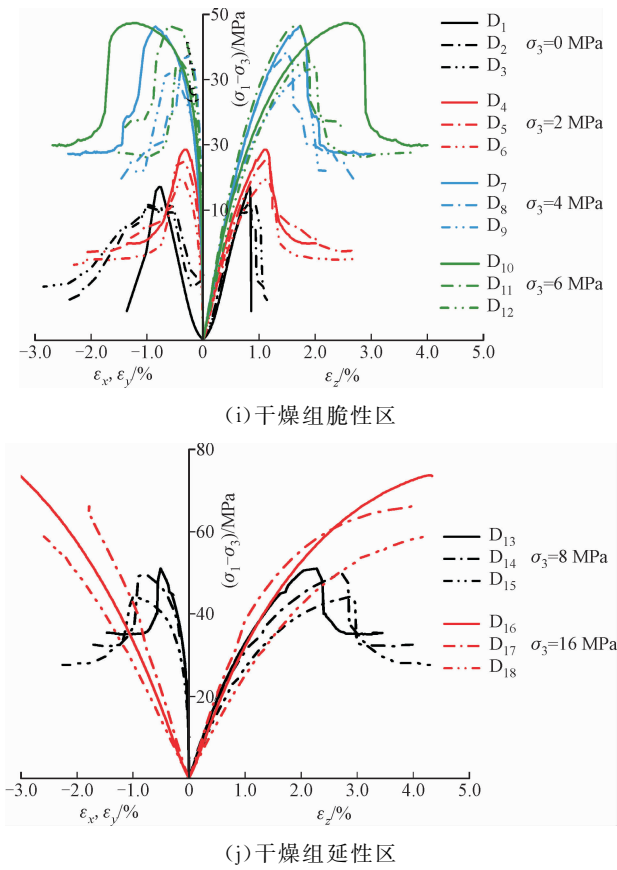


图 1 红层软岩试样破坏形态及偏应力-应变关系
Fig.1 Photographs of deformed samples and stress-strain curves of samples

胶结变成固化胶结,牢固度增强,所以干燥后试样的弹性模量增加。

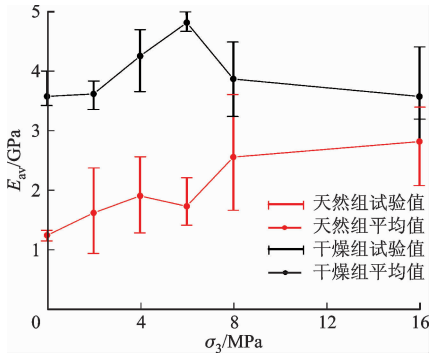


图 2 红层软岩弹性模量与围压的关系
Fig.2 Relationships between elastic modulus of red-bed soft rock and confining pressure

2 脆延特性分析

2.1 脆延转化特征

通过分析三轴试验获得的应力-应变关系与岩样破坏形态,将岩样破坏形式分为:脆性破坏,即应力-应变曲线有明显的峰值,峰后会迅速跌落至残余

强度,滑裂面明显且不规则,并伴随多条破裂面;半脆性破坏,即应力-应变曲线峰值不明显,到达峰值时会保持应力水平不变而发展一定的轴向应变,峰后缓慢跌落至残余强度,滑裂面光滑规则;延性破坏,即应力-应变曲线不发生跌落,没有明显的滑裂面,试样产生明显的横向膨胀。将脆性破坏划分在脆性区,半脆性破坏与延性破坏划分在延性区^[6,15-16]。所以,胡麻岭红层软岩天然组 0、2、4 MPa 为脆性破坏,6、8 MPa 为半脆性破坏、16 MPa 为延性破坏;干燥组 0、2、4、6 MPa 为脆性破坏,8 MPa 为半脆性破坏、16 MPa 为延性破坏。天然组的脆-延转化(BDT)压力在 4~6 MPa 之间,干燥组的 BDT 压力在 6~8 MPa 之间,BDT 压力增大了近 40%。

为进一步研究红层软岩脆-延转化特性,引入用于定量描述岩石脆延特性的脆性指标 B_d ^[8],该指标能同时考虑应力-应变曲线峰后应力降低的相对值和绝对速率。 B_d 越大,表明岩石脆性程度越高。 B_d 表达式如下

$$B_d = \frac{q_p - q_r}{q_p} \frac{\lg |k|}{10} \quad (1)$$

式中: q_p 为峰值应力; q_r 为残余应力; k 为峰值屈服起始点(A 或 a)到残余屈服起始点(C 或 c)的连线斜率 k_{ac} 、 k_{AC} (见图 3)。延性破坏时,试样不发生应力跌落,残余应力与峰值应力相等,所以 B_d 为 0。

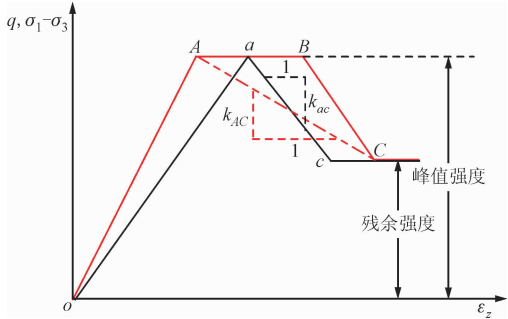


图 3 脆性指标计算示意图^[8]
Fig.3 Sketch of calculating process for brittleness index B_d

为准确分析 B_d 与围压的关系,对所有试样按照式(1)计算,结果见图 4。用指数函数拟合 B_d 与 σ_3 的关系,效果良好。拟合效果表明:随着围压的增加,软岩脆性降低,延性逐渐增强;同等围压条件下,干燥岩样脆性程度均高于天然岩样。

依照上文对软岩试样破坏区的分类,干湿组脆性区的 B_d 均大于 0.1,而延性区的 B_d 均在 $[0, 0.1]$ 。则可将 $B_d = 0.1$ 的特征参数定义为 BDT 脆性指数,即试样的脆性指数大于该特征参数为脆性区,小于该参数为延性区。由于同一特征值可定量

地表征不同状态下试样的脆延特性,所以 BDT 脆性指数对脆-延转化特性的表征优于 BDT 压力。

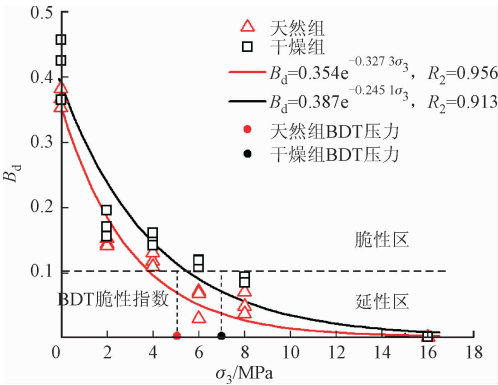


图 4 红层软岩脆性指数 B_d 与围压的关系
Fig.4 Relationship between the brittleness index B_d and confining pressure of samples

2.2 脆延区强度参数及特征应力分析

软岩典型的全应力-应变曲线通常分为:阶段Ⅰ为初始压密变形,阶段Ⅱ为弹性变形,阶段Ⅲ区弹塑性变形,阶段Ⅳ为软化变形,阶段Ⅴ为残余变形。5个阶段由 4 个特征应力点划分,分别为闭合应力 q_{cl} 、初始屈服应力 q_{in} 、峰值应力 q_p 、残余应力 q_r ,见图 5。

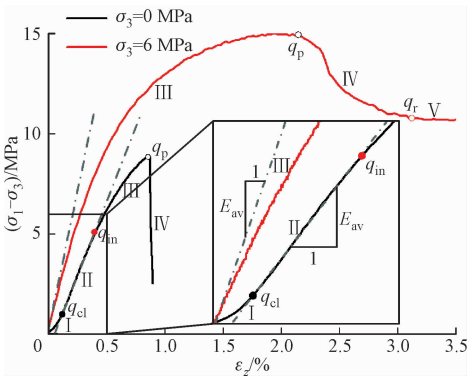


图 5 软岩典型应力-应变图
Fig.5 Typical stress-strain curve of soft rock

对于湿组不同围压下试样的各特征应力进行获取,如表 2 所示。

软岩由松散的矿物颗粒堆积体沉积、固结、成岩作用形成,属摩擦型材料。常规三轴试验中,试样达到应力峰值后均符合 Mohr-Coulomb(M-C)强度准则。在主应力空间内,M-C 准则方程可表示为

$$(1 + \sin \varphi) \sigma_1 - (1 - \sin \varphi) \sigma_3 - 2c \cos \varphi = 0 \quad (2)$$

式中: c 、 φ 为 M-C 材料的强度参数黏聚力与内摩擦角。为拟合方便,将式(2)进一步改写为

$$\sigma_1 = K \sigma_3 + P \quad (3)$$

表 2 不同围压下红层软岩特征应力值

Table 2 Characteristic stress values of samples under different confining pressure

σ_3 /MPa	q_{cl} /MPa	q_{in} /MPa	q_p /MPa	q_r /MPa
1	1.72 *	5.21 *	10.64 *	0.00 *
	0.86 *	5.05 *	8.87 *	0.00 *
	0.93 *	4.61 *	8.83 *	0.00 *
	3.01 †	9.29 †	20.91 †	0.00 †
	4.61 †	11.94 †	23.47 †	0.00 †
	3.79 †	10.55 †	20.86 †	0.00 †
	3.89 *	14.70 *	8.26 *	
	3.73 *	13.97 *	8.02 *	
	3.64 *	14.22 *	6.64 *	
	2.44 †	8.82 †	27.75 †	17.45 †
2	1.23 †	8.78 †	24.78 †	12.44 †
	0.89 †	9.91 †	29.24 †	14.86 †
	1.38 *	16.81 *	11.67 *	
	1.58 *	16.03 *	9.67 *	
	1.10 *	17.67 *	11.21 *	
4	0.25 †	6.30 †	48.17 †	29.19 †
	6.73 †	41.16 †	25.90 †	
	0.41 †	4.21 †	44.25 †	24.82 †
	14.90 *	10.69 *		
	15.92 *	13.62 *		
6	19.14 *	14.07 *		
	1.83 †	42.62 †	28.65 †	
	4.39 †	48.22 †	33.58 †	
	2.81 †	48.54 †	29.97 †	
	18.74 *	13.32 *		
8	16.44 *	12.93 *		
	19.54 *	16.41 *		
	43.97 †	27.98 †		
	49.64 †	32.07 †		
	50.91 †	34.98 †		
16	28.86 *	28.86 *		
	24.30 *	24.30 *		
	29.35 *	29.35 *		
	73.51 †	73.51 †		
	58.15 †	58.15 †		
	66.20 †	66.20 †		

注:上角标 * 为天然状态组;上角标 † 为干燥状态组。

$$K = \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} = \tan^2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right) \quad (4)$$

$$P = 2c \left(\frac{\cos \varphi}{1 - \sin \varphi} \right) = 2c \tan \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right) \quad (5)$$

式中: K 为围压影响系数; P 为 $\sigma_1 - \sigma_3$ 强度曲线的截距。所以,强度参数为

$$c = \frac{P}{2\sqrt{K}} \tag{6}$$
$$\varphi = 2\arctan \sqrt{K} - \frac{\pi}{2} \tag{7}$$

对红层软岩脆延性区,分别用式(3)分段拟合峰值应力点与残余应力点的 $\sigma_1-\sigma_3$ 强度曲线,结果见图 6,拟合效果良好。干湿状态组脆性区与延性区拟合直线的斜率与截距明显不同,表明脆延性两个区域试样的强度特性显著不同。现有研究^[17-18]同样表明,随着围压增加,岩石由脆性破坏过渡至延性破坏后,强度增长率发生变化,呈现明显的非线性,并基于此提出了二次抛物线型、双曲线型^[6]、指数型^[17]、多段函数修正型^[18]等非线性 M-C 屈服准则。根据拟合结果获得的 K 与 P 值,进一步通过式(6)(7)计算各区域的强度参数,见表 3,其中 c_P 、 φ_P 与 c_R 、 φ_R 分别为峰值应力点与残余应力点的黏聚力与内摩擦角。

表 3 干湿组红层软岩在脆、延性区的强度参数
Table 3 The strength parameters of dry and natural samples in brittle and ductile zones

状态	区域	c_P/MPa	$\varphi_P/(\text{^\circ})$	c_R/MPa	$\varphi_R/(\text{^\circ})$
天然组	脆性区	2.913	28.70	0.214	34.98
	延性区	5.398	15.51	0.919	25.64
干燥组	脆性区	4.509	44.08	0.514	46.18
	延性区	8.465	31.76	0.291	41.78

除延性区残余应力点外,脆延性区干燥组的黏聚力均大于天然组,这是由于试样干燥后的固化胶结强度高于原始水胶胶结。发生破坏后,试样沿着滑裂面滑移,剪切带区域内颗粒间的胶结完全破坏,使得干湿状态残余点的黏聚力均远小于峰值点,且接近于 0 MPa。干湿组延性区的黏聚力均大于脆性区,为脆性区的 1.8 倍。这是由于脆性区试样产生塑性变形,会迅速达到应力峰值,并迅速跌落至残余强度;而延性区试样进入弹塑性变形阶段会缓慢达到峰值点,保持应力不变并发展一定的轴向应变,该阶段颗粒组构不断发生改变,以更紧密的方式重新排列镶嵌,增加了黏聚力。脆延性区干燥组内摩擦角均高于天然组,为天然组的 1.31~2.04 倍。因为天然状态的矿物颗粒表面覆盖水膜,水的润滑作用使得内摩擦角远低于干燥组试样。干湿组试样在残余应力点的内摩擦角均大于峰值点,这一结论与文献^[19-20]的研究结论一致。这是由于峰值点颗粒相对位置滑移较小,大部分颗粒间的摩擦力属静摩擦范畴,内摩擦角不能发挥其全部作用。随着试样破坏产生滑裂面,颗粒滑移开始加大,静摩擦会向动摩擦转变,内摩擦角会不断发挥增加。干湿状态下的试样在延性区的内摩擦角均小于脆性区,为脆性区的 50.4%~90.5%,原因将在本文后续章节分析。

由表 2 可知,天然状态岩样内的微裂隙在施加围压后已经发生闭合,干燥试样的抵抗变形能力增强,围压需要达到 4~5 MPa,微裂隙才会闭合。所以,闭合应力仅存在于天然状态 0 MPa 组及干燥状态 0、2、4 MPa 组。

干湿组岩样在单轴压缩条件下的初始屈服应力均介于 0.4~0.5 倍的峰值应力,该结果与锦屏大理岩^[13]、Lac du Bonnet 花岗岩^[21]试验结果一致。初始屈服应力仅存在于干湿组脆性区的试样中,且随着围压的增加而降低,即随着围压的增加,施加静水应力阶段岩样已经产生了塑性变形,所以初始屈服

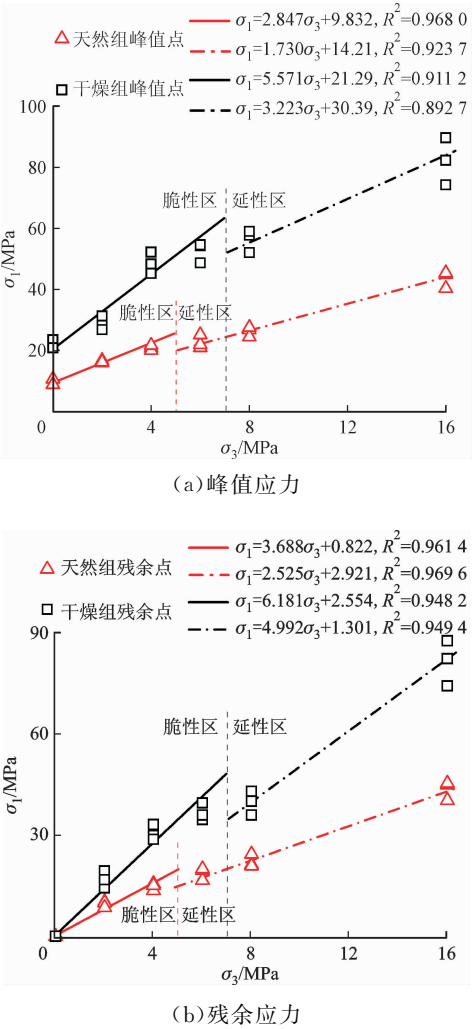


图 6 红层软岩各屈服点 $\sigma_1-\sigma_3$ 强度曲线
Fig. 6 Relationship between σ_1 and σ_3 at different yield points of samples

面需选用帽子模型,与文献[22]结论一致。本文选用的帽子模型^[23],初始结构强度为

$$f(p, q, p_s, p_0) = q^2 - M^2(p + p_s)(p_0 - p) = 0 \quad (8)$$

式中: p_0 为等向固结压力,即初始屈服面与 p 轴的交点, p_s 与初始结构强度相关,2 个参数均为拟合参数; M 为临界状态线的斜率,常规三轴试验中 $M = 6\sin\varphi/(3 - \sin\varphi)$ 。由于初始屈服应力仅存在脆性区, φ 为脆性区峰值应力点的内摩擦角。用式(8)对干湿组试样的初始屈服应力进行拟合,拟合效果良好,见图 7。干燥组拟合值 p_s 大于天然组,表明干燥组初始结构强度高于天然组。

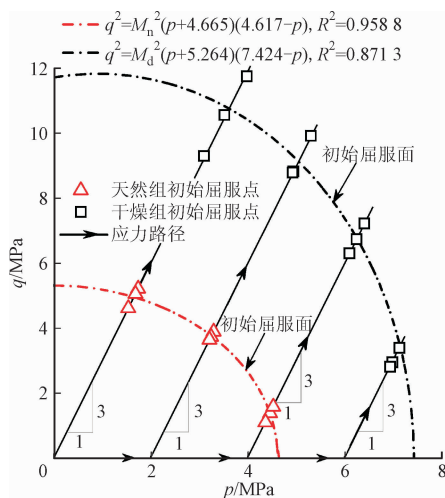


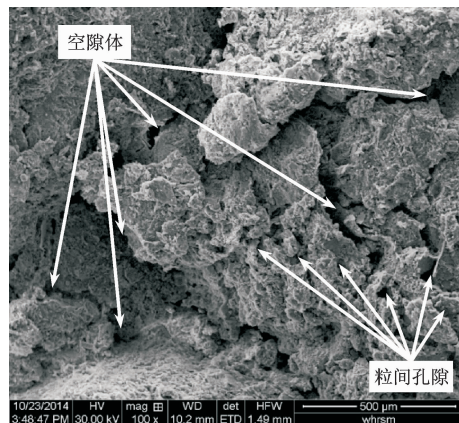
图7 依据式(8)的初始屈服应力拟合结果

Fig. 7 Fitting curves of the testing data of initial yield stress points via eq. (8)

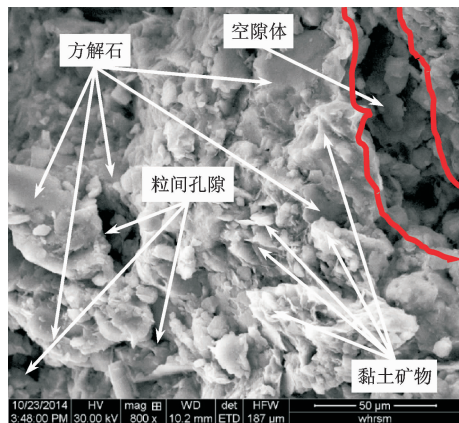
3 讨论

对本文用红层软岩进行 SEM 电镜扫描,结果如图 8 所示。从中可以清楚地观察到,软岩是由多种矿物颗粒,胶结物和空隙组成的复合体,空隙由连通的空隙体与独立封闭的粒间孔隙组成。当空隙体发生闭合,胶结物不破坏,软岩矿物颗粒组构保持不变;当粒间孔隙发展贯通时,胶结发生破坏,颗粒组构发生变化。为更清楚地描述岩样受外载荷下各阶段细观形态变化,提出了一个能充分反映软岩组成成分的代表体元(REV)单元,见图 9。该 REV 单元由空隙体与岩石基质体构成,岩石基质体包含矿物颗粒、粒间孔隙与胶结物。

常规三轴压缩试验中,初始阶段为施加静水应力阶段,待静水应力增加至设计围压并稳定后开始施加偏应力,即脆性区试样进入阶段 I 初始压密变



(a)放大倍率为 100



(b)放大倍率为 800

图8 红层软岩 SEM 扫描电镜照片

Fig. 8 SEM photos of the red-bed soft rock

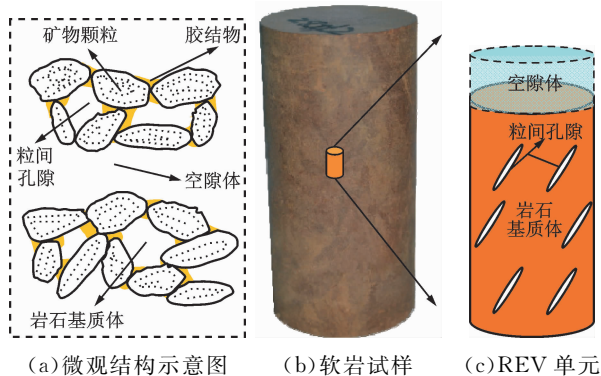


图9 REV 单元示意图

Fig. 9 Schematic of the REV element

形阶段,该阶段的变形为空隙体的压缩变形与岩石基质体的弹性变形。随着偏应力增加至闭合应力 q_{cl} ,空隙体完全闭合,进入阶段 II 弹性变形阶段。高围压下,施加静水应力过程中空隙体已完成闭合,则开始施加偏应力时岩样直接进入阶段 II,该阶段的变形仅为岩石基质体的弹性变形。当偏应力增加至

初始屈服应力 q_{in} , 试样进入阶段Ⅲ弹塑性变形阶段。进入该阶段后, 剪切带区域内颗粒间的胶结物发生破坏, 矿物颗粒组构开始发生变化, 并伴随粒间孔隙的集聚、发展, 该阶段的变形为岩石基质体的弹塑性变形。当围压较小时, 对粒间孔隙的发展无抑制作用, 偏应力增加至峰值应力 q_p , 滑裂面会迅速贯通, 结构凝聚力瞬间丧失, 强度降低, 呈现应力-应变软化, 试样为脆性破坏, 即进入阶段Ⅳ软化变形阶段。应力跌落至残余应力 q_r , 与滑裂面之间作用力的竖向分力达到平衡, 试样进入平稳的阶段Ⅴ残余变形阶段。延性区试样在施加静水应力时, 已经产生塑性变形, 即试样施加偏应力时, 已经进入阶段Ⅲ。该阶段侧向应力会抑制粒间孔隙的集聚、发展, 剪切带区域内的矿物颗粒滑移、转动, 使得该区域内的结构密实。岩样密实引起的强度硬化与结构破损而产生的强度软化效应同时发生, 则应力-应变曲线会缓慢升至峰值应力点, 再缓慢跌落至残余强度, 试样为半脆性破坏。当围压完全抑制粒间孔隙的发展时, 岩样将不产生贯通滑裂面, 偏应力增加, 矿物颗粒不断调整位置, 岩样结构不断密实, 应力应变曲线呈现硬化。

依据前文对弹性模量的分析, 随着围压增加, 试样弹性模量增加, 但干湿组软岩由脆性区进入延性区, 试样的弹性模量均会发生陡降, 锦屏大理岩^[20]、Bentheim 砂岩^[24]与 Tave 石灰岩^[25]也有同样的试验结果。延性区试样剪切时, 部分颗粒间的胶结已经发生了破坏, 但新形成的密实结构相比初始结构, 新连接处没有胶结, 抵抗变形能力变弱, 所以围压大于 BDT 压力后岩样的弹性模量会有一个陡降值。由于干燥岩样胶结强度大于天然岩样, 干燥组弹性模量的陡降更明显于天然组。随着围压增加, 干湿状态的弹性模量逐渐接近, 这主要是由于剪切带区域内的颗粒间胶结大多发生了破坏, 相比胶结作用, 侧向压力对抵抗变形能力起主要作用, 所以随着围压增加, 含水状态对弹性模量的影响会弱化。延性区试样在施加偏应力前, 由于部分胶结已经发生破坏, 破坏产生的微小颗粒可提高大颗粒之间的润滑作用, 使得延性区的内摩擦角均小于脆性区。

由上文分析可知, 脆性区试样开始剪切时均在初始屈服面内, 延性区试样均在初始屈服面外。即当施加围压小于等向固结压力 p_0 时, 试样剪切初始阶段, 岩石基质体仅存在弹性变形, 颗粒组构未发生改变。当围压大于 p_0 时, 施加静水应力阶段内, 剪切带区域内颗粒的部分胶结已经发生破坏, 颗粒位

置发生调整, 组构改变, 所以 BDT 压力等于 p_0 。固化胶结使得干燥组试样的初始屈服面大于天然组, 干燥试样需要更大的应力条件才可以达到塑性阶段, 因此干燥组试样的 BDT 压力大于天然组。

4 结 论

本文对胡麻岭红层软岩干湿状态试样进行了不同围压下的常规三轴压缩试验, 根据分析各组试样的应力-应变关系、特征应力、强度参数的变化, 得到了含水状态对红层软岩脆-延转化特性影响规律。主要结论如下。

(1) 红层软岩干燥后对其强度、峰值应变、弹性模量影响明显。随着围压增加含水状态对弹性模量的影响会弱化, 同一围压下干燥后, 峰值强度增加了 93.39%~145.35%, 残余强度增加了 77.83%~133.72%, 弹性模量增大了 26.89%~191.68%, 峰值应变降低了 24.13%~88.92%。

(2) 胡麻岭红层软岩天然组的 BDT 压力为 4~6 MPa, 干燥组为 6~8 MPa, 脆-延转化压力增大了近 40%。该类软岩的 BDT 脆性指数为 0.1, 当试样的脆性指数大于 0.1 时试样为脆性区, 小于该特征值时为延性区。同一 BDT 脆性指数可定量地表征不同状态下试样的脆延特性, 该特征脆性指数对脆-延转化特性的表征优于 BDT 压力。

(3) 在脆-延转化区, 试样的弹性模量均会发生陡降, 干燥组陡降更明显于天然组。延性区的干湿试样的黏聚力均大于脆性区, 内摩擦角均小于脆性区。

(4) 脆-延转化压力等于等向固结压力。延性区试样在施加静水应力阶段时, 剪切带区域内颗粒的部分胶结已经发生破坏, 颗粒位置发生调整, 组构改变, 试样已经进入了弹塑性变形阶段。

致谢: 本文部分试验研究工作得到了西安交通大学宋丽副教授与中铁第一勘察设计院张天宇高工的指导与帮助, 特此致谢!

参考文献:

- [1] 陈从新, 卢海峰, 袁从华, 等. 红层软岩变形特性试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(2): 261-270.
- CHEN Congxin, LU Haifeng, YUAN Conghua, et al. Experimental research on deformation properties of red-bed soft rock [J]. Chinese Journal of Rock Me-

- chanics and Engineering, 2010, 29(2): 261-270.
- [2] 邓华锋, 周美玲, 李建林, 等. 水-岩作用下红层软岩力学特性劣化规律研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(A02): 3481-3491.
- DENG Huafeng, ZHOU Meiling, LI Jianlin, et al. Mechanical properties deteriorating change rule research of red-layer soft rock under water-rock interaction [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(A02): 3481-3491.
- [3] 湛文武, 原鹏博, 刘小伟. 分级加载条件下红层软岩蠕变特性试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(S1): 3076-3081.
- CHEN Wenwu, YUAN Pengbo, LIU Xiaowei. Study on creep properties of red-bed soft rock under step load [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(S1): 3076-3081.
- [4] 白永健, 葛华, 冯文凯, 等. 乌蒙山区红层软岩滑坡地质演化及灾变过程离心机模型试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(A01): 3025-3035.
- BAI Yongjian, GE Hua, FENG Wenkai, et al. Centrifugal tests on geological evolution and sliding process for red-bed soft rock landslide in Wumeng mountain area [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(A01): 3025-3035.
- [5] 钟志彬, 李安洪, 邓荣贵, 等. 高速铁路红层软岩路基时效上拱变形机制研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(2): 327-340.
- ZHONG Zhibin, LI Anhong, DENG Ronggui, et al. Study on time-dependent upheaval deformation mechanisms of red-bed soft rock subgrade of high-speed railways [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(2): 327-340.
- [6] EVANS B, FREDRICH J T, WONG T F. The brittle-ductile transition in rocks: recent experimental and theoretical progress [M]// The Brittle-Ductile Transition in Rocks. Washington, DC, USA: American Geophysical Union, 1990: 1-20.
- [7] YUAN Yusong, JIN Zhijun, ZHOU Yan, et al. Burial depth interval of the shale brittle-ductile transition zone and its implications in shale gas exploration and production [J]. Petroleum Science, 2017, 14(4): 637-647.
- [8] MENG Fanzhen, ZHOU Hui, ZHANG Chuanqing, et al. Evaluation methodology of brittleness of rock based on post-peak stress-strain curves [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2015, 48(5): 1787-1805.
- [9] XU Xiaoli, KANG Zongxin, JI Ming, et al. Research of microcosmic mechanism of brittle-plastic transition for granite under high temperature [J]. Procedia Earth and Planetary Science, 2009, 1(1): 432-437.
- [10] 黄润秋, 黄达. 卸荷条件下岩石变形特征及本构模型研究 [J]. 地球科学进展, 2008, 23(5): 441-447.
- HUNAG Runqiu, HUANG Da. Study on deformation characteristics and constitutive model of rock on the condition of unloading [J]. Advances in Earth Science, 2008, 23(5): 441-447.
- [11] 吕龙龙, 宋丽, 张天宇. 易崩解性软岩试样制备方法 [J]. 土工基础, 2016, 30(5): 601-603.
- LÜ Longlong, SONG Li, ZHANG Tianyu. Sample preparations for strong slaking soft rocks [J]. Soil Engineering and Foundation, 2016, 30(5): 601-603.
- [12] 邓华锋, 李建林, 邓成进, 等. 岩石力学试验中试样选择和抗压强度预测方法研究 [J]. 岩土力学, 2011, 32(11): 3399-3403.
- DENG Huafeng, LI Jianlin, DENG Chengjin, et al. Analysis of sampling in rock mechanics test and compressive strength prediction methods [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(11): 3399-3403.
- [13] 张春生, 陈祥荣, 侯靖, 等. 锦屏二级水电站深埋大理岩力学特性研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(10): 1999-2009.
- ZHANG Chunsheng, CHEN Xiangrong, HOU Jing, et al. Study of mechanical behavior of deep-buried marble at Jinping II hydropower station [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(10): 1999-2009.
- [14] 许波涛, 尹健民, 王煜霞. 岩石干湿状态下动静弹模关系特征及工程意义 [J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(S1): 1755-1757.
- XU Botao, YIN Jianmin, WANG Yuxia. Correlation of dynamic and static elasticity moduli for dry and wet rock and its engineering signification [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20(S1): 1755-1757.
- [15] NYGÅRD R, GUTIERREZ M, BRATLI R K, et al. Brittle-ductile transition, shear failure and leakage in shales and mudrocks [J]. Marine and Petroleum Geology, 2006, 23(2): 201-212.
- [16] ISHII E, SANADA H, FUNAKI H, et al. The relationships among brittleness, deformation behavior, and transport properties in mudstones: an example from the Horonobe Underground Research Laboratory, Japan [J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2011, 116(B9): B09206.
- [17] YOU Mingqing. Comparison of the accuracy of some conventional triaxial strength criteria for intact rock

- [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2011, 48(5): 852-863.
- [18] SINGH M, RAJ A, SINGH B. Modified Mohr-Coulomb criterion for non-linear triaxial and polyaxial strength of intact rocks [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2011, 48(4): 546-555.
- [19] LI Hangzhou, XIONG Guangdong, ZHAO Guiping. An elasto-plastic constitutive model for soft rock considering mobilization of strength [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2016, 26(3): 822-834.
- [20] ZHANG Kai, ZHOU Hui, SHAO Jianfu. An experimental investigation and an elastoplastic constitutive model for a porous rock [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2013, 46(6): 1499-1511.
- [21] LAU J S O, CHANDLER N A. Innovative laboratory testing [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2004, 41(8): 1427-1445.
- [22] BAUD P, VAJDOVA V, WONG T F. Shear-enhanced compaction and strain localization: inelastic deformation and constitutive modeling of four porous sandstones [J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2006, 111(B12): 1-17.
- [23] SUEBSUK J, HORPIBULSUK S, LIU M D. Modified structured cam clay: a generalised critical state model for destructured, naturally structured and artificially structured clays [J]. Computers and Geotechnics, 2010, 37(7/8): 956-968.
- [24] WONG T F, DAVID C, ZHU Wenlu. The transition from brittle faulting to cataclastic flow in porous sandstones: mechanical deformation [J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 1997, 102(B2): 3009-3025.
- [25] VAJDOVA V, BAUD P, WONG T F. Compaction, dilatancy, and failure in porous carbonate rocks [J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2004, 109(B5): 1-6.

(编辑 杜秀杰)