

含不同胶结充填物的碳酸盐岩层面 剪切力学特性试验研究

周扬一¹, 冯夏庭¹, 徐鼎平¹, 李帅军¹, 陈东方²

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071;

2. 东北大学 深部金属矿山安全开采教育部重点实验室, 辽宁 沈阳 110819)

摘要: 层面是层状岩体稳定性的主控结构面, 层面的剪切力学行为及抗剪强度对建造于层状岩体中的地下工程具有重要影响。由于成岩时期物化作用的差异, 同一工程场址常发育不同地质特征(胶结充填物、粗糙度等)的层面。为了深入了解不同类型层面的剪切力学特性, 利用乌东德水电站地下厂房区域取得的胶结层面试样开展常法向应力及峰后降法向应力直剪试验。试验结果表明, 不同地质特征的层面表现出不同的剪切力学行为, 按有无明显峰值可将剪切变形-剪应力曲线分为 2 类, 无明显峰值层面的粗糙度和表面附着物均有别于有明显峰值层面。法向变形与法向应力直接相关, 但与层面类别之间的关系不明显。不同类型层面还表现出不同的剪胀行为及相应的剪胀角差异。胶结层面抗剪强度低于完整岩石但高于已分离层面, 对层状岩体起弱化作用。按层面地质特征对其进行分类有助于进一步理解层状岩体的复杂力学行为, 而选择不同层面力学模型可使计算更贴近实际工程岩体特征。

关键词: 岩石力学; 层面; 层状岩体; 胶结层面; 法向刚度; 剪胀角; 剪切力学行为

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2016)06-1161-12

Experimental study of the shear behavior of carbonate bedding planes cemented by different materials

ZHOU Yangyi¹, FENG Xiating¹, XU Dingping¹, LI Shuaijun¹, CHEN Dongfang²

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China; 2. Key Laboratory of Ministry of Education on Safe Mining of Deep Metal Mines, Northeastern University, Shenyang, Liaoning 110819, China)

Abstract: Bedding planes are of significant importance for the stability of layered rock mass. In order to perform detailed stability analysis for underground excavations in layered rock mass, it is necessary to gain sufficient knowledge of shear behavior and strength of bedding planes. Due to the complex physical and chemical processes involved during diagenesis, bedding planes exhibiting different geological features (cementation, roughness, etc) are often seen in a specific engineering site. In order to better characterize the shear behavior of these bedding planes, two types of shear tests, namely the constant normal stress tests and the post-peak stepwise-decreasing normal stress tests, were conducted using the cemented bedding plane samples obtained from underground caverns

收稿日期: 2015-04-04; **修回日期:** 2015-06-15

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(11232024); 国家自然科学基金国际合作重大项目(41320104005)

Supported by the Key Program of National Natural Science Foundation of China(Grant No. 11232024) and International Cooperation Major Program of National Natural Science Foundation of China(Grant No. 41320104005)

作者简介: 周扬一(1987-), 男, 2010年毕业于南京大学地质工程专业, 现为博士研究生, 主要从事复杂条件下大型地下洞室群岩体稳定性方面的研究工作。E-mail: zhouyangyi2007@163.com

DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2015.0361

of Wudongde hydropower station. Test results showed that obviously different shear behavior corresponded to different geological features. The curves of shear displacement-shear stress were mainly divided into two groups according to their peak and residual behavior. The roughness and surface materials of groups with clear peak shear stress were different from the ones without peak. Direct relationship existed between the normal stiffness and normal stress, however, no obvious correlation was found between the normal stiffness and bedding plane types. Dilation behavior and the corresponding dilation angles of different kinds were also observed. The shear strength of cemented bedding planes is higher than the one of the separated bedding planes and lower than the one of the intact rock, which weakens the whole rock mass. A deeper understanding of rock mass behavior can be achieved when the geological variety of bedding planes is properly considered.

Key words : rock mechanics ; bedding plane ; layered rock mass ; cemented bedding plane ; normal stiffness ; dilation angle ; shear behavior

1 引言

工程岩体中普遍发育不同尺度、不同类型的结构面,岩体稳定性很大程度上受这些结构面的控制^[1]。层状岩体作为一种常见的工程岩体,其控制性结构面为层面。层面是与岩石同期形成的原生结构面。层状岩体洞室中低应力地下经常发生的破坏类型为层面与其他结构面共同构成的块体垮落^[2],以及沿层面的岩体剪切滑移破坏^[3]等(见图1)。这些结构控制型破坏的机制与高地应力下岩石材料自身的破坏不同,因而描述完整岩石的强度准则对于预测岩体

结构型破坏稍显不足。大量的工程实践表明,层状岩体的破坏与层面的抗剪强度直接相关^[4],因此对层面力学特性、抗剪强度的研究及参数的合理选取是分析评价层状岩体稳定性的前提与基础。

层面有别于其他结构面之处在于其空间分布的连续性特征。地下工程岩体中常见的节理尺寸通常为1~10m。与节理相比,层面不仅产状相对恒定,而且空间延续性更好,常与整个工程建筑物相交切,因此影响范围更广。层面的另一特点是多样性。受岩性、变质程度、胶结程度、胶结物、充填物、粗糙度等因素影响,同一场址区的不同类型层面常表现出不同的剪切力学行为。如果仅以某一类层面的抗剪强度参数作为全部层面的参数,未免过于粗略。因此有必要根据层面地质特征与力学特征将层面分门别类,这将有助于快速判断层状岩体局部稳定性,以及深入理解层状岩体的破坏机制。

研究结构面剪切力学特征最常用的方法是直剪试验^[5]。结构面的力学行为(力学特征)、力学参数、本构模型与强度准则是结构面研究的3个核心问题。结构面力学特征可细分为变形特征^[6]及强度特征^[7],力学参数也可相应地分为变形参数及强度参数^[8]。无论是针对天然结构面,还是相似材料复制的具备规则或不规则表面的结构面,研究者先后提出了大量的结构面本构模型^[9-11]与强度准则^[12-15]。近年来,由于采用了三维表面扫描与建模技术,对结构面强度与壁面形态之间关系的研究越发深入^[16]。此外,考虑胶结及充填物影响的结构面强度特征也得到相应的关注^[17-18]。其他特定条件下的结构面研究还包括循环加载^[19]、渗流^[20]等内容。层面作为结构面的一种,其变形及强度特性自然与其他类型结构面有相似之处,因此通过直剪试验对层面剪切力学行为进行研究是合理的。



(a) 块体垮落



(b) 沿层面滑移

图1 层状岩体主要破坏形式

Fig.1 Failure modes of layered rock mass

本文利用直剪试验手段对不同类型的天然胶结层面试样的剪切力学行为进行研究,重点在于刻画不同类型层面的地质及力学特征,并对不同类型层面的相关力学参数(变形参数、强度参数、剪胀角)进行归纳分析。进而通过峰后降法向应力试验,探究层面峰后力学特征。最终通过对比剪断前后层面剪切强度的差异,探讨岩体中普遍发育的胶结层面对岩体强度的弱化作用。

2 试样制备与试验方法

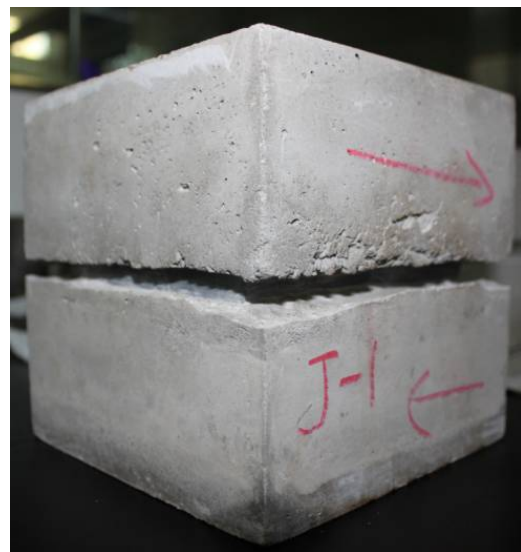
试验所用胶结层面岩石试样取自在建的金沙江乌东德水电站导流洞与地下厂房区域,岩性以微晶灰岩、白云岩为主,岩石坚硬致密,现场层面以钙质胶结或无充填为主。试样主要分 2 种,一种是胶结完好未断开的层面,另一种是试样加工时自行断开的层面,详见图 2。将试样加工成长×宽为 10 cm×10 cm~14 cm×14 cm 的近立方体,利用水泥砂浆进行包裹,最终制成 30 个边长为 15 cm 的标准立方体试样。1[#]~5[#]试样砂浆用水泥为 42.5 普通硅酸盐水泥,6[#]~30[#]试样为 32.5 复合硅酸盐水泥,砂为洁净中砂,水泥 砂 水 = 2.3 3.4 1(质量比)。通过观察可知,层面胶结物多为钙质,层面方向与层理平行。制样时尽可能保持层面方位与预定剪切方向一致。制备水泥砂浆试样时,为保证待剪面所在平面周围无砂浆,采用了上下分离式的模具,先浇筑试样的下半部分,待砂浆达到一定强度后,在待剪面上下 0.5~1.0 cm 范围内利用充填物进行占位,再浇筑上半部分。试样制备后养护 28 d 以上。为了对比完整岩石与层面抗剪强度的差异,对同种岩石还制备了 6 个 $\phi 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 的圆柱样。完整岩石与水泥砂浆的基本力学参数如表 1 所示。制样前对预定受剪面各边边长及两边夹角进行了测量,并利用 CAD 软件计算出受剪面面积。该面积用于计算预定法向应力对应的法向力以及进行剪切面积修正等。



(b) 已断开层面



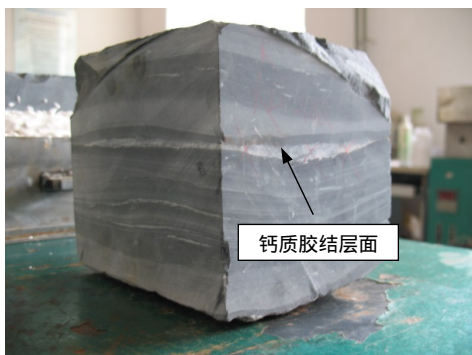
(c) 水泥砂浆浇筑及模具



(d) 试样

图 2 直剪试样

Fig.2 Shear test specimens



(a) 胶结层面

表 1 完整岩石与水泥砂浆基本力学参数

Table 1 Basic mechanical parameters of intact rock and mortar

类别	水泥 标号	弹性模 量/GPa	泊松比	单轴抗压强 度/MPa	抗拉强 度/MPa
完整岩石	-	50~80	0.26	100~110	6.7
水泥砂浆	42.5	16.1~17.3	0.10~0.15	47.9~55.1	-
水泥砂浆	32.5	13.1~15.3	0.11~0.16	52.3~54.0	-

直剪试验在中国科学院武汉岩土力学研究所 RMT-150C 试验系统上完成。根据预定的剪切方向安放试样于剪切盒内，剪切盒上下部均安装辊轴以减少剪切盒与外界摩擦阻力。法向力与剪切力均由 500 kN 力传感器测定，法向位移由压头位移传感器和 4 个 LVDT 同时测定，剪切位移由 1 个水平向 LVDT 测定，所有试验数据由计算机自动采集。法向荷载施加速度为 0.1 kN/s，法向应力共分 1, 2, 3, 4 和 5 MPa 五级(每个试样只在其中某一级应力下测试)。剪切过程采用位移控制，剪切速率约为 0.002 mm/s。部分试样还进行了峰后法向力逐级减小的试验，以模拟洞室开挖后边墙区域陡倾层面的卸荷过程。

针对初始胶结完好的试样，首次剪切试验将其沿层面剪断，而后将剪断试样上下部重合，进行第二次剪切；对于已断开试样，只进行一次试验。剪切试验以达到峰后残余强度为终止条件，通常终止时的剪切位移为 6~7 mm。剪切试验装置如图 3 所示。

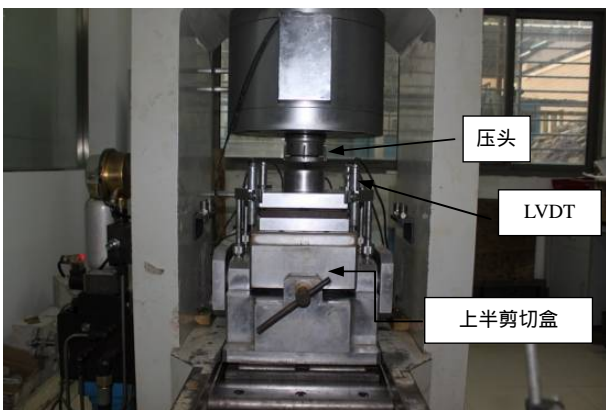


图 3 剪切试验装置
Fig.3 Shear test apparatus

3 试验结果及分析

3.1 层面分类及特征

根据试验后层面的残留物质成分、粗糙起伏程度等特征，将层面分为若干大类，详细信息列于表 2。

由于试验之前胶结试样并未断开，隐含在岩石中的层面位置只能依靠外部痕迹进行识别，如白色的钙质胶结条带、岩性分界面等，造成部分试样沿完整岩石剪断，且剪断力明显高于其他含胶结层面试样。此类试样的剪断峰值应力将视为完整岩石抗剪强度。以表 2 的层面分类为基础，以下将基于试

验数据的统计分析对各类层面的剪切力学行为及参数特征进行阐述。其中在求解层面法向刚度及描述胶结层面对岩体弱化作用时涉及到(第一次)剪断试验结果，其余试验结果均仅指(第二次)层面剪切试验结果。

3.2 典型试验曲线及特征

试验结果整理后发现，属于同一类型层面的各试样剪切变形-剪切应力曲线特征较为一致，并且在测试的法向应力范围内受法向应力影响不明显，这表明按层面特征分类是合理的。按表 2 分类绘制各类层面典型曲线如图 4 所示。通过对比可以发现，曲线按其特征可分为有明显峰值(第一、三、四、六类)及无明显峰值(第二、五类)2 种。与层面图片对比可知，峰值有无与层面粗糙度及层面物质有关。无明显峰值的层面比有明显峰值的层面表面更为平整光滑，并且层面附着绢云母一类的片状矿物，造成剪切过程中表面突起物磨损不明显。有明显峰值的各类层面的细微差别在于峰前与峰后曲线形态。第一、六两类层面曲线形态基本一致，表现为峰前弹塑性与峰后应变软化。第三类层面峰前有一较为明显的应力水平段，峰后应力跌落比其他类型层面更迅速。第四类层面峰后应力跌落在各类层面中最为缓慢，从峰值到残余强度产生的剪切变形量也最大。

3.3 剪切力学参数

由于对同一试样进行了 2 次试验(剪断+剪切)，因而可获得层面处于胶结以及分离状态下的 2 条法向变形-法向应力曲线。假设法向应力施加与卸除过程中试验系统、砂浆、岩石材料的变形均为弹性变形，那么同一应力对应的 2 条曲线变形差值即为层面的法向变形，如图 5 所示。

拟合法向变形-法向应力曲线可利用 Goodman 公式^[2]及 Bandis 公式^[6]，其中 Goodman 四参数公式为

$$\frac{\sigma_n - \sigma_{n0}}{\sigma_{n0}} = A \left(\frac{u_n}{u_n^m - u_n} \right)^t \quad (1)$$

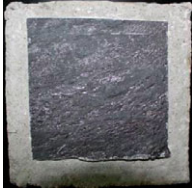



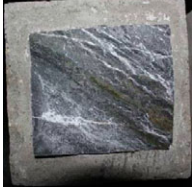


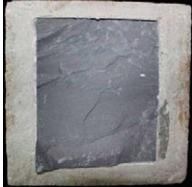

式中： σ_n 为法向应力， σ_{n0} 为参考法向应力， A 和 t 为材料参数， u_n 为法向变形量， u_n^m 为最大法向变形量。Bandis 两参数公式为

$$\sigma_n = K_{n0} \left(\frac{u_n}{1 - u_n / u_n^m} \right) \quad (2)$$

式中： K_{n0} 为初始法向刚度。

表 2 不同类型层面特征

Table 2 Features of different types of bedding planes

类别	试样编号	层面特征	照片
一	1 [#] , 5 [#] , 14 [#] , 18 [#] , 20 [#] , 21 [#] , 22 [#] , 23 [#] , 25 [#] , 26 [#]	层面平直粗糙, 起伏差约 1 mm, 主要为钙质胶结, 钙质层厚度为 1~2 mm。局部发育碳质薄膜。碳质薄膜光滑, 反光性好, 易污手, 分布通常不连续, 但偶尔也会大面积连续出现, 并伴随一组平行线状小陡坎。有时层面与层面间距很小(1 mm 及以下)。平行于灰岩层理, 并常与钙质层伴生发育, 见于右岸主厂房碳质薄膜区	
二	2 [#] , 7 [#] , 9 [#] , 12 [#] , 24 [#]	层面平直光滑, 无充填物, 发育一组平行线状小陡坎。层面主要物质为方解石、白云石及微量绢云母(X 衍射分析结果), 呈丝绢光泽。有时层面与层面间距很小(1 mm 及以下), 将岩石分为若干薄层。发育于灰岩与石英岩屑砂岩交界面或岩屑砂岩层内部, 并与灰岩层理平行, 见于右岸主厂房	
三	3 [#] , 10 [#] , 19 [#]	层面平直粗糙, 略有起伏, 发育细小但不明显的平行陡坎, 钙质胶结, 有时局部可见铁质(铁锈色), 发育于灰岩与石英岩屑砂岩交界面, 见于右岸主厂房	
四	4 [#] , 6 [#] , 8 [#] , 11 [#]	层面平直粗糙, 起伏差约 1 mm, 发育不明显的平行陡坎, 局部常有铁质(铁锈色)晕染, 发育于灰岩中所含的钙质胶结层(方解石脉), 胶结层厚度为 3~5 mm, 见于右岸主厂房	
五	13 [#] , 30 [#]	层面起伏光滑, 总体呈波状, 起伏差数毫米, 发育平行小陡坎, 表面物质除钙质外还含有少量绿泥石和绢云母(X 衍射分析结果)。层面在岩石表面上呈现为深色细条带, 平行于灰岩层理发育, 见于右岸导流洞	
六	17 [#]	层面平直粗糙, 略有起伏, 发育平行线状小陡坎, 表面物质除钙质(方解石、白云石)外还含有微量绢云母(X 衍射分析结果), 呈丝绢光泽。岩石为大理岩化白云岩。层面平行于层理发育, 见于右岸主变室及左岸主厂房	
七	29 [#]	层面平直粗糙, 无陡坎, 表面物质主要为钙质, 并可见明显风化(黄色)痕迹, 见于 3 [#] 尾调室边墙	
八	15 [#] , 27 [#]	完整岩石剪断面, 表面较为平整, 剪断的岩石为灰岩(灰岩与石英岩屑砂岩互层), 见于右岸主厂房	
九	16 [#] , 28 [#]	完整岩石剪断面, 表面起伏, 局部为拉断。剪断的岩石为灰岩, 见于右岸主厂房及 3 [#] 尾调室	

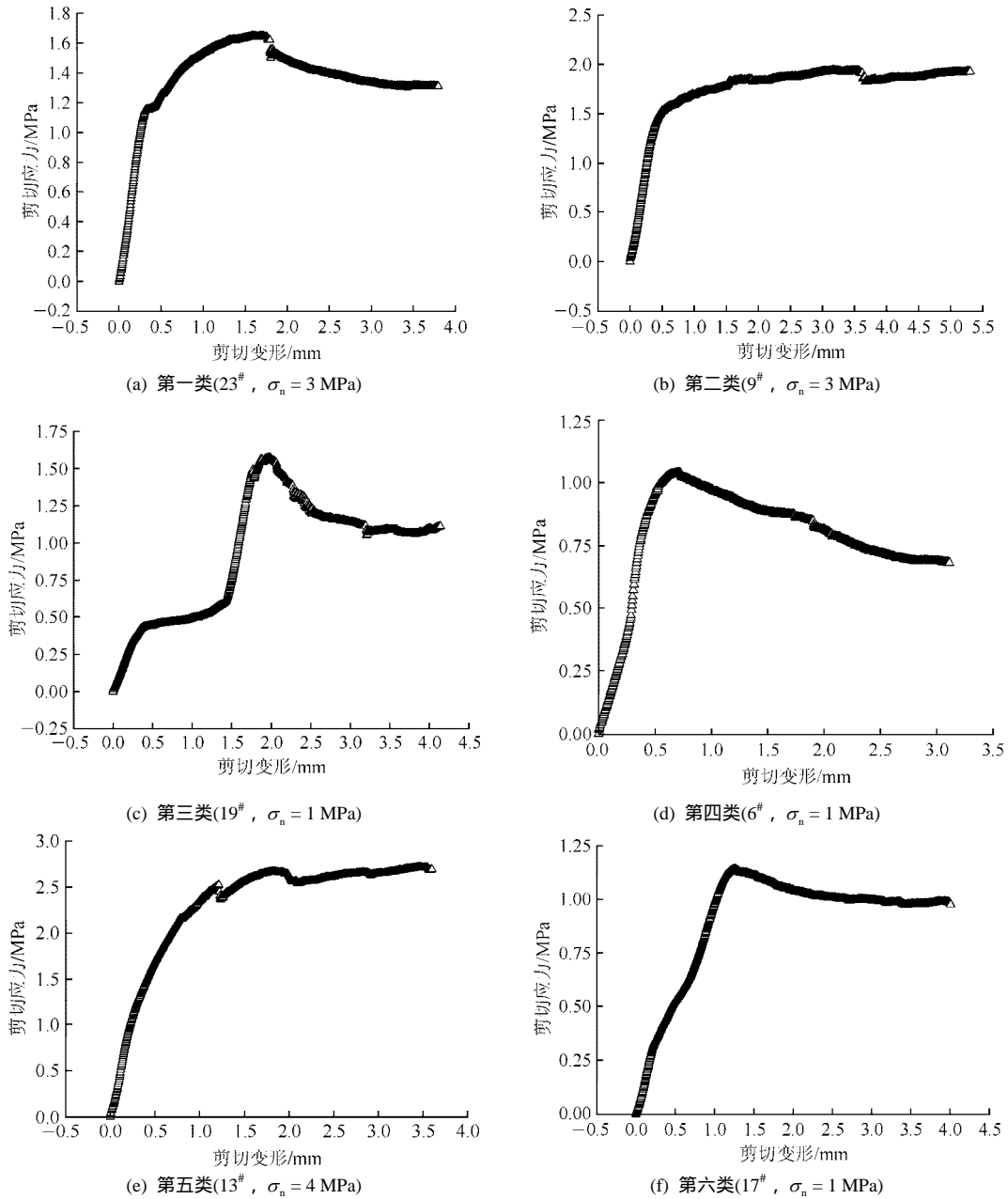


图 4 不同类型层面典型剪切变形-剪切应力曲线

Fig.4 Shear displacement-shear stress curves of different types of bedding planes

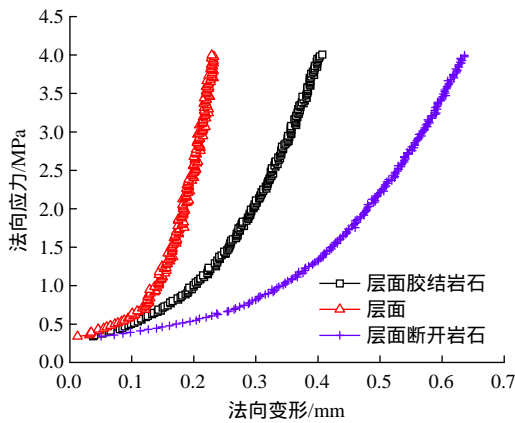


图 5 法向变形-法向应力曲线

Fig.5 Normal displacement-normal stress curves

对拟合曲线求导可得到法向变形-法向刚度曲线, 并利用 Bandis 两参数公式拟合该曲线, 最终结果列于表 3。Bandis 法向变形-法向刚度两参数公式为

$$K_n = K_{n0} \left(1 - \frac{u_n}{u_n^m} \right)^{-2} \quad (3)$$

数据处理时发现利用 Goodman 公式(简称 G 公式)与 Bandis 公式(简称 B 公式)拟合得到的最大法向变形量并不完全一致, Bandis 公式相对偏小一些, 而 Goodman 公式有时可达数毫米, 与事实不符, 因此表 3 中的最大法向变形量以 Bandis 公式为准。此

表 3 部分层面法向变形特征

Table 3 Normal deformation features of some bedding planes

试样编号	法向应力/ MPa	达到预定法向应力时		拟合曲线及参数					
		法向变形/mm	拟合法向刚度/ (GPa · m ⁻¹)	$u_n-\sigma_n$		u_n-K_n		$K_{no}/(\text{GPa} \cdot \text{m}^{-1})$	u_n^m/mm
				公式	R^2	公式	R^2		
1 [#]	2	0.210	40.10	G	0.998	B	0.998	1.65	0.26
2 [#]	1	0.121	9.52	G	0.988	B	0.959	2.62	0.24
3 [#]	1	0.089	37.10	G	0.997	B	0.976	2.44	0.12
5 [#]	2	0.075	43.30	G	0.924	B	0.922	9.38	0.13
6 [#]	1	0.153	35.30	G	0.829	B	0.971	0.84	0.18
10 [#]	2	0.077	34.20	G	0.957	B	0.955	14.60	0.21
11 [#]	1	0.090	19.10	G	0.952	B	0.909	4.89	0.17
13 [#]	4	0.078	78.50	G	0.967	-	-	-	-
15 [#]	4	0.233	55.20	G	0.991	B	0.949	4.52	0.32
17 [#]	1	0.112	68.10	B	0.768	B	0.998	1.26	0.13
18 [#]	5	0.179	138.30	B	0.966	B	0.997	6.35	0.23
23 [#]	3	0.160	50.60	G	0.987	B	0.953	8.93	0.26
26 [#]	4	0.220	48.80	G	0.990	B	0.964	5.24	0.32
29 [#]	3	0.114	61.50	G	0.943	B	0.922	9.03	0.18

注：G 表示 Goodman 公式，B 表示 Bandis 公式。

外，利用 Goodman 公式对法向变形-法向应力曲线的拟合更为合适。根据拟合结果，层面最大法向变形量为 0.1~0.3 mm，且各类层面之间没有明显差异。所有层面的法向刚度均表现为与法向应力相关。

根据剪切刚度定义，将各试样剪切变形-剪切应力曲线的初始线性段斜率作为剪切刚度，并按照层面类别进行统计，结果如图 6 所示。如图所示，各类层面的(平均)剪切刚度并不一致，其中第一、二、五类层面剪切刚度均值相当，并且略高于第三、四类层面的剪切刚度均值。第六、七类层面由于数量少仅具有参考意义。横向对比法向刚度与剪切刚度可知，层面初始法向刚度与剪切刚度处于同一数量级，但随法向应力增加，法向刚度逐渐增长为初始值的数倍至数十倍。

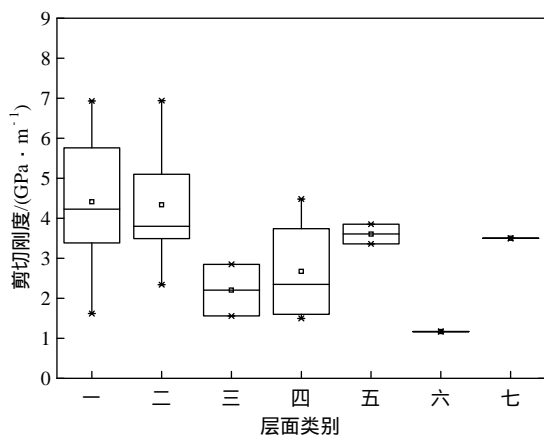
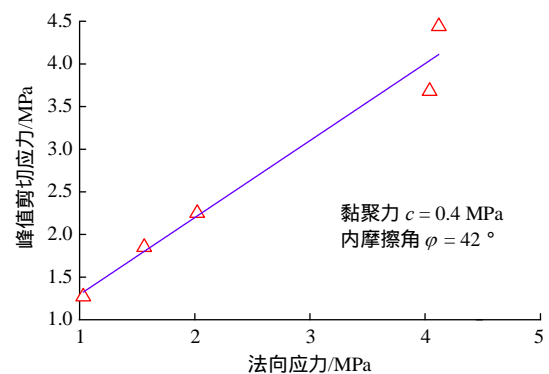


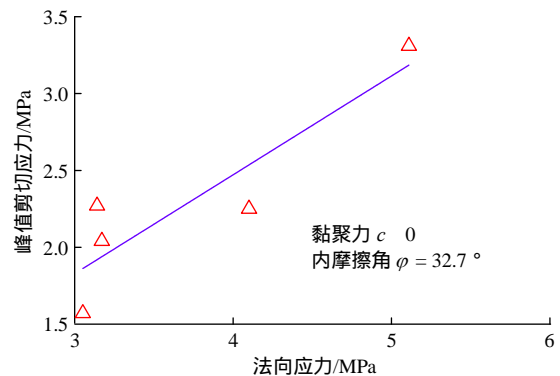
图 6 各类层面剪切刚度箱线图

Fig.6 Boxplot of shear stiffness of each type of bedding plane

鉴于数据有限，仅选取第一、二类层面进行强度参数回归分析，结果如图 7 所示。回归分析结果表明，第一类与第二类层面的抗剪强度参数明显不



(a) 第一类层面



(b) 第二类层面

图 7 不同类型层面的抗剪强度参数

Fig.7 Shear strength parameters for different types of bedding planes

同。第一类层面的黏聚力与峰值内摩擦角均高于第二类层面。其中内摩擦角的差异是层面粗糙度差异的直接体现，而黏聚力的差异除了与层面粗糙程度有关外，还可能受层面表面附着的矿物成分影响(碳质薄膜、绢云母等)，详见表 2。

3.4 剪胀性

试验中所有试样均表现出一定的剪胀行为。根据剪切变形 – 法向变形曲线剪胀段斜率可求出剪胀角，剪胀角与层面类型的关系列于表 4。不同类型层面的平均剪胀角有所差别，每一类层面的剪胀角上下波动也很明显。一般认为，影响剪胀角的 2 个因素为层面粗糙度及法向应力。粗糙度相近的第一类层面各试样法向应力与剪胀角关系如图 8 所示(21[#]及 22[#]试样未取得剪胀角数据，故未绘制)，基本表现出剪胀角随法向应力增加而减小的趋势。比较各类层面的粗糙度可知，由于第二类层面在各类层面中最为平滑，因此其平均剪胀角也最小。

表 4 剪胀角与层面类型关系

Table 4 Relationship between dilation angle and type of bedding plane

类别	剪胀角/(°)
一	0.5 ~ 5.9(3.6)
二	1.1 ~ 5.5(2.9)
三	4.5 ~ 7.4(5.6)
四	5.7 ~ 13(7.6)
五	(6.1)
六	5.2

注：括号中为均值。

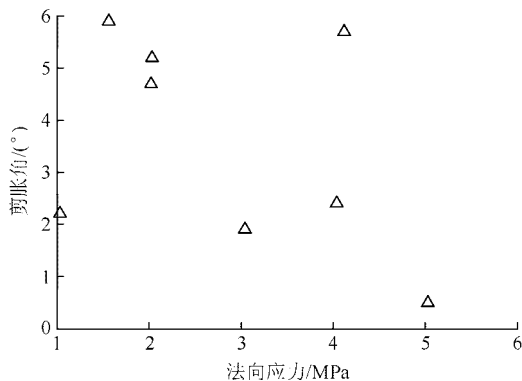


图 8 第一类层面的法向应力 – 剪胀角关系

Fig.8 Relationship between normal stress and dilation angle for type 1 bedding plane

对各试样剪胀起始点进行分析发现，剪切力作用初期试样表现出不同程度的剪缩，随着剪切变形增大剪缩速率逐渐减小，而后保持法向变形量不变并逐渐过渡到剪胀阶段或无过渡直接进入剪胀阶段。峰前法向剪胀变形量很小，剪胀起始点常接近

剪应力峰值点。峰值后剪胀现象明显。典型法向变形 – 剪切应力曲线如图 9 所示。

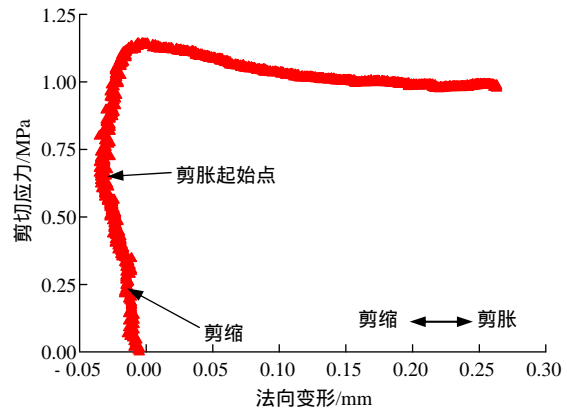
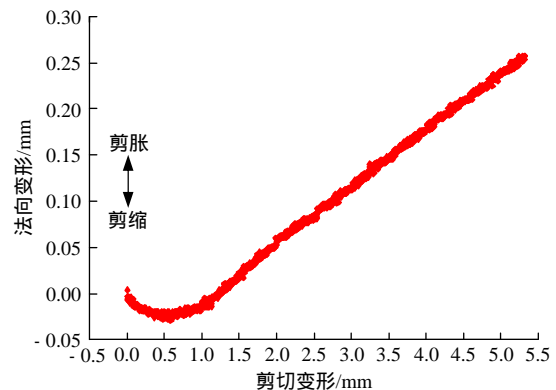


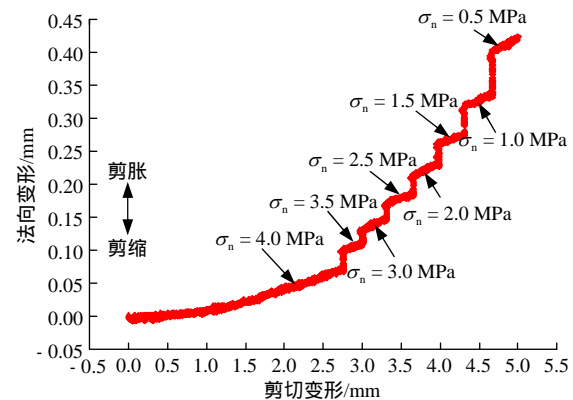
图 9 法向变形 – 剪切应力曲线

Fig.9 Curve of normal displacement-shear stress

剪胀与法向应力的关系如图 10 所示。在剪切应力 – 剪切变形峰后段，若法向应力保持不变，剪胀角基本保持不变，甚至有减小趋势(见图 10(a))；若峰后法向应力逐级减小，法向压缩变形产生回弹，剪胀角随剪切变形增加有增大的趋势。特别地，若试验中可实现法向应力连续减小，剪切变形 – 法向



(a) 峰后法向应力不变



(b) 峰后法向应力减小

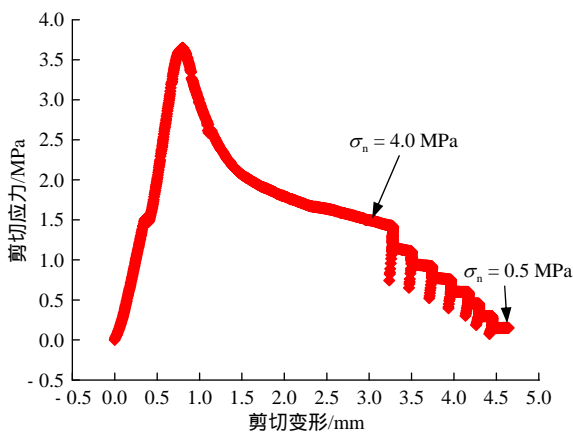
图 10 剪胀与法向应力关系

Fig.10 Relationships between dilation behavior and normal stress

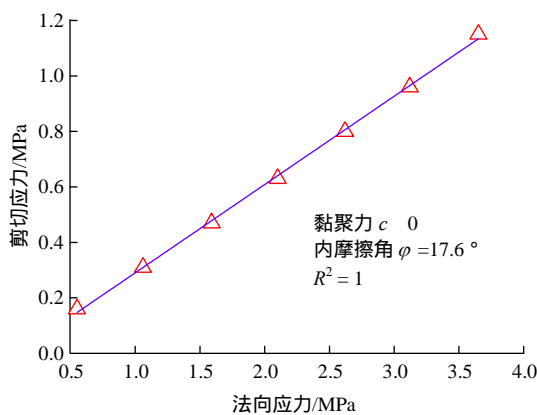
变形曲线将形成一条一阶导数大于 0 的平滑连续曲线,该曲线切线斜率代表剪胀角,因而此时剪胀角是不断增大的(见图 10(b))。需要说明的是,法向应力减小引起的法向总回弹变形中有部分变形是砂浆和岩石的回弹变形,但鉴于结构面法向循环加载试验已经证明法向应力减小时结构面确有回弹变形^[6],因此图 10 曲线总体趋势应当是与只有层面回弹的情况相一致,但实际法向变形量应比实测值小。

3.5 峰后特征

为了考察层面剪切曲线峰后段在法向应力逐级递减条件下的变化趋势,对部分试样进行了峰后法向应力逐级减小的试验,法向力递减速率约为 1 kN/s。该试验主要目的是模拟地下洞室开挖后边墙区域陡倾层面法向应力不断减小的卸荷过程,试验典型曲线如图 11 所示。法向应力减小对剪胀角的影响已在节 3.4 进行了论述,本节主要讨论法向应力减小过程中残余强度特征。



(a) 剪切应力-剪切变形曲线(每级递减 0.5 MPa)



(b) 峰后段各级法向应力-剪切应力(面积修正后)

图 11 峰后法向应力逐级减小试验曲线

Fig.11 Curves of stepwise decreasing of post-peak normal stress

理论上若法向应力连续减小,峰后剪应力-剪切变形曲线应呈现出连续下降趋势,但由于试验系

统性能的限制,无法做到法向应力连续调整,因而峰后曲线是分段式的,但曲线整体变化趋势不受影响。试验过程中法向应力减小的同时剪应力也随之减小,而后随试验系统自行调整恢复到一个稳定值。根据各级法向应力与对应的剪应力稳定值,通过回归分析可以求取层面残余内摩擦角(回归结果表明残余黏聚力基本为 0,见图 11(b))。试验中实测的残余内摩擦角变化较大,范围为 17°~44°,均值为 31°,各类层面的残余内摩擦角见表 5。峰后曲线表明,残余摩擦角控制着峰后法向应力调整过程中的抗剪强度。开挖后由于层面法向应力减小首先引起层面卸荷张开,而后在岩层自重作用下有可能造成沿层面剪切滑移破坏。

表 5 各类层面残余内摩擦角

Table 5 Residual friction angles for each type of bedding plane

类别	残余内摩擦角/(°)
一	均值 24.8(4 个)
二	均值 28.7(3 个)
三	41.3
四	34.8
五	均值 38.3(2 个)
七	32.1

注:括号中为统计样本数。

4 层面对岩体强度的弱化

碳酸盐岩体中的胶结层面构成岩体的潜在破裂面。为了分析这种隐含层面对岩体强度的弱化程度,将圆柱体、立方体试样的峰值剪断应力及立方体试样峰值剪切应力(面积修正后)数据绘于同一坐标系下进行比较,如图 12 所示。

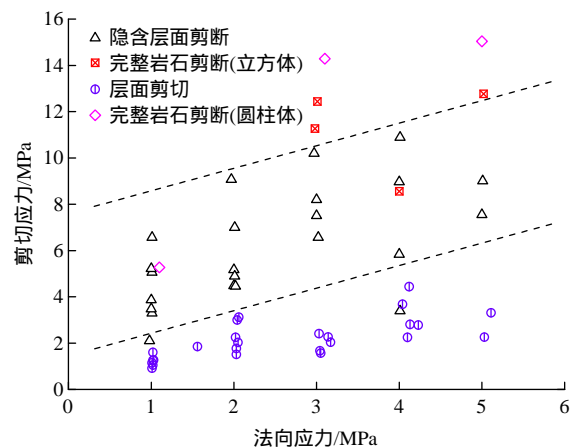


图 12 不同条件下的峰值剪应力-法向应力关系

Fig.12 Relationships between peak shear stress and normal stress in different conditions

如图 12 所示, 根据不同试样峰值剪应力数值大小, 可用 2 条直线将剪切破坏类型分为 3 个区域, 分别对应不同的破坏方式。图 12 上部区域表示完整岩石剪切破坏区, 峰值剪应力在 11 ~ 15 MPa 范围, 代表岩石材料自身的抗剪能力, 但完整岩石的剪破坏在中低地应力地下工程中较少发生。中间区域为含有胶结层面的岩石沿层面剪断区, 该区域中层面抗剪强度随法向应力增加而增加, 但均小于完整岩石抗剪强度, 这反映的事实是岩体中由于沉积作用产生的层面起初并未断裂, 或地质历史中曾经发生过断裂, 而后经化学作用重新胶结, 其自身抗拉、抗剪强度均已小于完整岩石, 因而降低了岩体整体强度, 并具有潜在破坏的可能。下部区域为已分离层面的抗剪强度区, 该区域内抗剪强度明显小于胶结层面, 代表由于开挖应力调整使层面张开后的剪切破坏。同一法向应力条件下, 3 个区域平均抗剪强度比为(5 ~ 6) (3 ~ 4) 1。

实际上, 根据对现场岩体破坏现象的观察, 不仅是胶结层面, 其他钙质胶结的结构面也可能成为岩体破裂优先发育之处, 如图 13 所示。这表明一旦岩石完整性由于受先期构造活动影响遭到破坏, 而后期胶结充填物强度又小于岩石材料自身强度, 那么这些先期已破裂之处将构成潜在的破坏面。

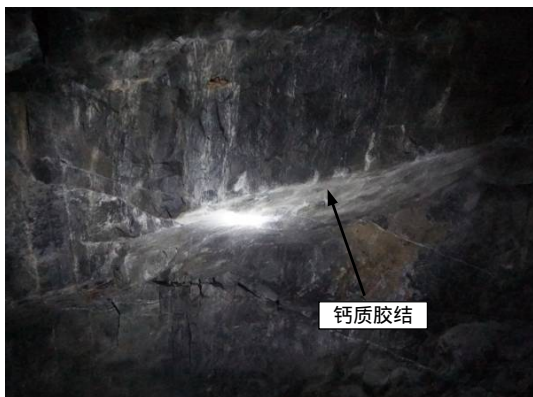


图 13 岩体沿钙质胶结节理破坏

Fig.13 Failure along calcite-cemented joint in rock mass

5 讨论

5.1 现场层面状况

乌东德水电站是我国在建的又一座千万千瓦级水电站, 其地下洞室群开挖体量巨大, 主厂房设计跨度 30.5 m, 高度近 90 m。由于主厂房部分洞段岩层走向与洞室轴线方向夹角较小(小于 20°), 高边墙区域的岩体稳定性自然成为重点关注对象。影响高边墙稳定性的岩体力学要素很多, 但其中最基本的

则是层面力学特性。

虽然本次试验涵盖了多种类型的层面, 但现场出露的层面类型更为多样化。调查发现, 受地下流体作用, 现场部分层面表现出不同程度的风化, 如图 14 所示。风化层面主要分为 2 种: 一种是岩石壁面风化, 无充填(见图 14(a)); 另一种是有充填物的风化层面(层面夹泥、夹泥与碎石混合物等, 见图 14(b))。根据壁面强度 JCS 的定义^[4], 壁面风化对层面抗剪强度的影响不容忽视。夹泥层面从定义上属于软弱结构面, 其剪切力学行为受充填物厚度及抗剪强度控制, 与硬性结构面行为不同。这 2 种层面不在本次试验考察范围之内, 但由于其抗剪强度比同等应力水平条件下无充填及胶结层面低, 因而成为控制现场层状岩体稳定性的主要结构面。



(a) 壁面风化 (b) 夹泥层面

图 14 风化层面

Fig.14 Weathered bedding plane

5.2 抗剪强度各向异性

通过观察层面表面形态发现, 几乎所有试样表面均发育一组平行小陡坎, 这些定向分布的陡坎可能造成层面抗剪强度表现出各向异性特征。L. Jing 等^[21]利用混凝土复制节理面试样证实了抗剪强度存在各向异性, 并建议用椭圆型分布函数描述这种强度各向异性。鉴于本次试验所用层面主要突起物为平行陡坎, 有理由假定平行于陡坎伸长方向为最小抗剪强度方向, 而垂直陡坎伸长方向为最大抗剪强度方向, 并可利用一椭圆函数描述抗剪强度的方向性特征。

5.3 本构模型的选择

试验结果表明, 不同类型层面的剪切力学行为可以根据有无明显峰值加以区别, 而有无峰值与层面粗糙度、层面附着物等因素有关。相应地, 选择

合适的层面剪切本构模型时也需要考虑不同粗糙度、层面物质及壁面强度的影响。例如，对于第一类层面，可以选择用弹塑性应变软化模型^[22]，而第二类层面可近似用理想弹塑性模型描述，如图 15 所示。

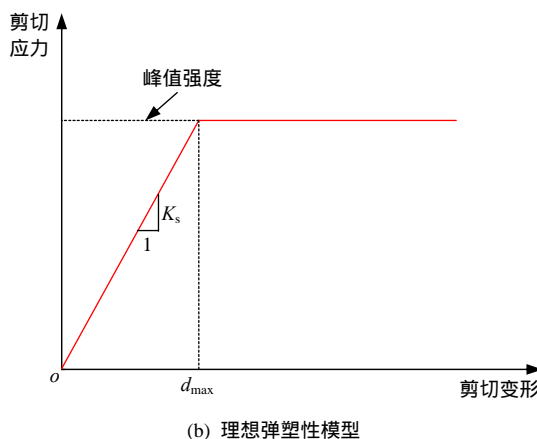
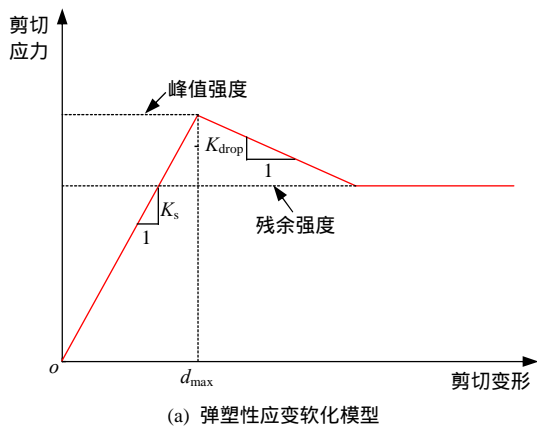


图 15 不同类型层面的剪切本构模型示意图

Fig.15 Schematic view of constitutive models for different types of bedding plane

5.4 对试验曲线水平段的解释

试验中发现，超过半数的试样在剪切初期剪应力随剪切变形增长而增加，但在剪切变形达到 0.3 ~ 0.5 mm 时剪应力增速变缓，甚至出现剪应力水平段，且水平段长度不一。此后随剪切变形增加剪应力又开始增大直至峰值(见图 4(c))。这种现象在其他类型剪切试验中也出现过，如完整岩石剪断^[23]，夹泥结构面剪切^[24]，断续节理剪切^[25]等。对此现象的产生原因不同学者有不同的解释，如剪切盒与试样间隙的影响，岩样的拉破坏，充填物的破坏与挤出，节理尖端翼裂纹扩展等。通过检查试验后层面发现，除剪切造成的划痕与突起物磨损外，还有层面物质的片状剥离以及局部岩石的拉破坏现象发生，如图 16 所示。剪应力水平段的产生可能与上述破坏现象有关，即剪应力水平段可能对应局部非剪切破坏形式。



(a) 层面物质剥离 (b) 局部岩石拉断

图 16 剪切试验后层面破坏现象

Fig.16 Surface failure features after tests

这表明表面附着物质(如钙质胶结物)的层面剪切时除发生突起的磨损剪断外，还可能产生表面物质的剥离^[26]。

6 结 论

本文以取自乌东德水电站的碳酸盐岩胶结及无充填层面试样为研究对象，通过常法向应力直剪试验测定不同类型层面的剪切力学特征及相关参数，并重点考察层面的剪胀特性及峰后行为，以及胶结层面对层状岩体的弱化作用，得到如下主要结论：

(1) 同一岩石工程区域发育的不同地质特征的层面，可表现出不同的剪切力学行为，应当以不同的力学参数及力学模型进行表征刻画，而不能简单地等同视之。层面的多样性影响沉积岩体工程稳定性的分析结果。

(2) 层面的典型剪切变形 - 剪切应力曲线特征与其他节理面基本一致。按有无明显峰值可将试验曲线分为 2 种，无明显峰值层面的粗糙度及层面附着物均异于有明显峰值层面。前者可选择理想弹塑性模型进行描述，而后者表现出弹塑性应变软化特征。

(3) 层面在剪切过程中均表现出剪胀特征，剪胀起始点通常位于峰前但距峰值点很近。不同类型层面有其各自的剪胀角及残余内摩擦角。剪胀角受层面粗糙度影响，并随法向应力减小而增大。残余摩擦角控制层面峰后剪切行为。

(4) 胶结层面通常是由先期已分离层面二次胶结形成，由于胶结物抗剪强度低于完整岩石，因此构成岩体中潜在的弱面。一旦开挖后层面法向应力降低或由于应力调整使层面剪切应力增加，岩体将优先沿这些弱面破坏。

致谢 感谢中国长江三峡集团公司和长江勘测规划设计研究院对本研究的大力支持。

参考文献(References) :

- [1] 谷德振. 岩体工程地质力学基础[M]. 北京: 科学出版社, 1979: 214-218.(GU Dezhen. Fundamentals of rock mass engineering geomechanics[M]. Beijing: Science Press, 1979: 214-218.(in Chinese))
- [2] GOODMAN R E, SHI G. Block theory and its application to rock engineering[M]. New Jersey: Prentice-Hall, Inc., 1985: 4-9.
- [3] HAMMETT R D, HOEK E. Design of large underground caverns for hydroelectric projects with particular reference to structurally controlled failure mechanisms[J]. Recent Developments in Geotechnical Engineering for Hydro Projects, 1981: 192-206.
- [4] BARTON N, CHOUBEY V. The shear strength of rock joints in theory and practice[J]. Rock Mechanics, 1977, 10(1/2): 1-54.
- [5] 黄曼, 杜时贵, 罗战友, 等. 基于多尺度直剪试验的岩石模型结构面抗剪强度特征研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(11): 3180-3186. (HUANG Man, DU Shigui, LUO Zhanyou, et al. Study of shear strength characteristic of simulation rock structural planes based on multi-size direct shear tests[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(11): 3180-3186.(in Chinese))
- [6] BANDIS S C, LUMSDEN A C, BARTON N R. Fundamentals of rock joint deformation[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 1983, 20(6): 249-268.
- [7] BARTON N. Review of a new shear-strength criterion for rock joints[J]. Engineering Geology, 1973, 7(4): 287-332.
- [8] BARTON N. The shear strength of rock and rock joints[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 1976, 13(9): 255-279.
- [9] GOODMAN R E. Methods of geological engineering in discontinuous rocks[M]. [s.l.]: West Publishing Company, 1976: 322-326.
- [10] PLESHA M E. Constitutive models for rock discontinuities with dilatancy and surface degradation[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 1987, 11(4): 345-362.
- [11] BANDIS S, LUMSDEN A C, BARTON N R. Experimental studies of scale effects on the shear behaviour of rock joints[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 1981, 18(1): 1-21.
- [12] LADANYI B, ARCHAMBAULT G. Simulation of shear behavior of a jointed rock mass[C]// The 11th US Symposium on Rock Mechanics (USRMS). [S.l.]: American Rock Mechanics Association, 1969: 105-125.
- [13] ZHAO J. Joint surface matching and shear strength part B: JRC-JMC shear strength criterion[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1997, 34(2): 179-185.
- [14] 夏才初, 肖维民, 丁增志. 非贯通节理 Jennings 强度准则的岩桥弱化和节理面起伏角修正[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(3): 485-492.(XIA Caichu, XIAO Weimin, DING Zengzhi. Modification of Jennings strength criterion for intermittent joints considering rock bridge weakening and joint surface undulating angle[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(3): 485-492.(in Chinese))
- [15] 杜时贵, 胡晓飞, 郭霄, 等. JRC-JCS 模型与直剪试验对比研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(增1): 2747-2753.(DU Shigui, HU Xiaofei, GUO Xiao, et al. Comparison study of JRC-JCS model and direct shear test[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(Supp.1): 2747-2753.(in Chinese))
- [16] GRASSELLI G, EGGER P. Constitutive law for the shear strength of rock joints based on three-dimensional surface parameters[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2003, 40(1): 25-40.
- [17] BOULON M, ARMAND G, HOTEIT N, et al. Experimental investigations and modelling of shearing of calcite healed discontinuities of granodiorite under typical stresses[J]. Engineering Geology, 2002, 64(2): 117-133.
- [18] INDRARATNA B, OLIVEIRA D A F, BROWN E T, et al. Effect of soil-infilled joints on the stability of rock wedges formed in a tunnel roof[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2010, 47(5): 739-751.
- [19] JING L, STEPHANSSON O, NORDLUND E. Study of rock joints under cyclic loading conditions[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 1993, 26(3): 215-232.
- [20] BROWN S R. Fluid flow through rock joints: the effect of surface roughness[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth(1978-2012), 1987, 92(B2): 1337-1347.
- [21] JING L, NORDLUND E, STEPHANSSON O. An experimental study on the anisotropy and stress-dependency of the strength and deformability of rock joints[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 1992, 29(6): 535-542.
- [22] USEFZADEH A, YOUSEFZADEH H, SALARI-RAD H, et al. Empirical and mathematical formulation of the shear behavior of rock joints[J]. Engineering Geology, 2013, 164: 243-252.
- [23] 衡帅, 杨春和, 曾义金, 等. 基于直剪试验的页岩强度各向异性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(5): 874-883.(HENG Shuai, YANG Chunhe, ZENG Yijin, et al. Anisotropy of shear strength of shale based on direct shear test[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(5): 874-883.(in Chinese))
- [24] 徐鼎平, 冯夏庭, 崔玉军, 等. 白鹤滩水电站层间错动带的剪切特性[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(增1): 2692-2703.(XU Dingping, FENG Xiating, CUI Yujun, et al. Shear behaviors of interlayer staggered zone at Baihetan hydropower station[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(Supp.1): 2692-2703.(in Chinese))
- [25] LAJTAI E Z. Shear strength of weakness planes in rock[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 1969, 6(5): 499-515.
- [26] JAEGER J C. Friction of rocks and stability of rock slopes[J]. Geotechnique, 1971, 21(2): 97-134.