DOI：10.16285/j.rsm.2022.1143

层间错动带水力耦合抗剪强度特性演化规律研究

范 雷，余美万，邬爱清，向 前

（长江科学院 水利部岩土力学与工程重点实验室，湖北 武汉 430010）

摘 要：层间错动带具有延伸规模大、物理力学性质较差等特点。水库蓄水后，水位抬升使层间错动带受到较大的水压力。在高水压力作用下，层间错动带的抗剪强度及其演化规律，尚待开展试验研究。采用新研发的 HMSS-300 型现场结构面水力耦合直剪试验系统，针对溪洛渡水电站的层间错动带进行了不同水压力–应力耦合作用下的直剪试验，探讨了层间错动带水力耦合作用下的抗剪强度特征及其变化规律。研究结果表明：水力耦合作用下，层间错动带抗剪断过程的剪应力–剪切位移曲线具有明显的峰值，法向位移随剪切位移的增加大多表现出先剪胀后剪缩的特征。层间错动带的有效内摩擦角随水压力的升高而降低，二者呈负指数关系；有效黏聚力也随水压力的升高而降低，二者同样呈负指数关系。在 0～2.0 MPa 水压力条件下，层间错动带有效内摩擦角劣化程度为 7%～22%，有效黏聚力的劣化程度为 32%～93%，表明水压力的增加对层间错动带的有效黏聚力影响更加明显。在不同法向荷载–水压力耦合作用下层间错动带呈现出剪切滑移破坏模式与中、细角砾岩颗粒的剪断–滑移混合破坏模式。在水力耦合条件下，黏土矿物的软化、膨胀与水侵入层间错动的颗粒之间以及黏土矿物的结构单位层之间形成水分子层是导致层间错动带抗剪强度劣化的主要因素。

关 键 词：层间错动带；水力耦合；现场直剪试验；抗剪强度

中图分类号：TU452 **文献标识码：**A **文章编号：**1000－7598 (2023) 07－1959－12

Evolution of shear strength of interlayer dislocation zone under hydro-mechanical coupling conditions

FAN Lei, YU Mei-wan, WU Ai-qing, XIANG Qian

(Key Laboratory of Geotechnical Mechanics and Engineering of the Ministry of Water Resources, Changjiang River Scientific Research Institute, Wuhan, Hubei 430010, China)

Abstract: The interlayer dislocation zone has the characteristics of large extension scale and poor physico-mechanical properties. After reservoir impoundment, the rise of the water level imposes greater water pressure on the interlayer dislocation zone. Under the action of high water pressure, the shear strength of the interlayer dislocation zone and its evolution law need to be studied. In this paper, the newly developed direct shear test system HMSS-300 is used to conduct the direct shear tests under different hydro-mechanical coupling conditions on the interlayer dislocation zone of Xiluodu Hydropower Station. The characteristics and variation law of shear strength of the interlayer dislocation zone under the hydro-mechanical coupling conditions are discussed. The test results show that under the hydro-mechanical coupling conditions, the shear stress-shear displacement curve of the shear strength of the interlayer dislocation zone has an obvious peak value. The normal displacements mostly show the dilation first and then shrinkage as the shear displacement increases. With the increase in water pressure, both the effective internal friction angle and the effective cohesion of the interlayer dislocation zone decrease in a negative exponential relationship. Under the water pressure of 0−2.0 MPa, the degradation degrees of the effective internal friction angle and the effective cohesion of the interlayer dislocation zone are 7%−22% and 32%−93%, respectively. It indicates that the increase of water pressure has a greater effect on the effective cohesion of the interlayer dislocation zone. Under the coupling action of normal load and water pressure, the interlayer dislocation zone presents a shear-slip failure mode and a mixed shear-slip failure mode of medium and fine breccia particles. Under the hydro-mechanical coupling conditions, the softening and swelling of clay minerals, and water molecular layers formed by the water intrusion into the interlayer dislocation particles and the structural unit layers of clay minerals are the main factors that deteriorate the shear strength of the interlayer dislocation zone.

收稿日期：2022-07-22 录用日期：2023-01-16

基金项目：国家自然科学基金项目（No.51927815，No.42277186）；中央级公益性利研院所基本利研业务费项目（No.CKSF2021532/YT）。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (51927815, 42277186) and the Fundamental Research Funds for Central lnetitutea of China(CKSF2021532/YT).

第一作者简介：范雷，男，1982 年生，博士，正高级工程师，主要从事工程岩体力学特性方面的研究工作。E-mail: fanchon1982@126.com

Keywords: interlayer dislocation zone; hydro-mechanical coupling; in-situ direct shear test; shear strength

1 引 言

水岩相互作用是水库蓄水诱发岸坡岩体变形、孕育重大工程灾害的主导因素。意大利 Vajont 滑坡[1]、法国 Malpasset 拱坝溃坝[2]以及国内三峡库区千蒋坪滑坡[3]等水库蓄水灾害均表明，对于一些存在软弱夹层的岸坡岩体，其潜在环境影响风险在工程建设期间一般暴露不充分，蓄水后水力条件的改变将引起库岸岩体变形与灾变，目前对有关水库蓄水触发的含软弱夹层岸坡岩体的变形机制仍然认识不足，这也是当今水利水电工程建设与运行对环境问题影响的前沿课题。

层间错动带是发育于岩流层界面或靠近界面附近，具有不同程度构造错动的层间结构面，其物理力学性质较差，是影响岩体稳定性的重要结构面。为了了解层间错动带的结构与强度特性，近十几年来国内学者围绕我国西南地区重大水利水电工程坝址区的软弱夹层或层间错动带，进行了系列研究，并取得了重要成果。例如，唐良琴等[4]研究了向家坝软弱夹层粒度成分与抗剪强度参数之间的关系。江权[5]、徐鼎平[6-8]、赵阳[9]、史存鹏[10]、段淑倩[11]、韩钢[12-13]、张春生[14]等针对白鹤滩水电站层间错动带，分别开展了直剪试验研究，分析了物质成分、充填厚度、微观结构、糙度系数、试件尺度、应力路径等不同因素对层间错动带抗剪强度特性的影响规律，建立了白鹤滩层间错动带抗剪强度经验模型，提出了层间错动带的力学参数。国外方面，Fishman[15]综合分析了在俄罗斯、独联体国家和其他国家开展的不同地质条件下的 156 次现场试验成果，研究了软弱夹层和构造带的抗剪强度参数。Indraratna 等[16-17]系统研究了充填厚度、填充物摩擦角、接缝壁粗糙度、填充物类型和充填物的饱和度等不同因素对软弱夹层剪切性能的影响。Jahanian 等[18]进行了软弱夹层在恒定法向载荷下的直剪试验，研究了不同粗糙度和填充特征对软弱夹层抗剪强度的影响规律。

而针对水−力耦合作用对结构面抗剪强度特性影响的研究方面，李天一等[19]开展了高孔隙水压力作用下岩体软弱面（带）力学特性的试验研究，获得了抗剪强度参数随水压力变化的规律。许江等[20]进行了不同充填度下岩体剪切−渗流耦合试验，研究了充填物及水压力对结构面抗剪强度的影响。张亮等[21]通过试验研究建立了规则齿形结构面剪切渗流耦合条件下的抗剪强度经验公式，揭示了抗剪强度随渗透压力的增大而减小的变化规律。唐林等[22]对不同含水率的含软弱夹层岩体进行室内直剪试验研究，揭示了含水率对其抗剪强度与破坏模式的影响。此外，Esaki[23]、Olsson[24]、Lee[25]、Li[26]、王刚[27]、尹立明[28]、Park[29]、夏才初[30]等也通过研发渗流−应力耦合剪切设备，进行了结构面的渗流−应力耦合试验，研究了结构面在水岩耦合条件下的剪切变形与破坏问题，进一步深化了对结构面应力耦合特性的认识。

但是，受到层间错动带充填物质的复杂性以及试验技术条件的限制，考虑水力耦合作用的结构面变形强度特性的研究大多集中于单节理裂隙等硬性结构面的渗流−应力耦合特性研究。对于层间错动带或软弱结构面，目前尚未开展水力−应力耦合作用下的变形强度特性研究。本文依托工程溪洛渡水电站，层间错动带作为坝址区的主要渗流通道，当水库蓄水水位抬升后，受到较大的水压力，在高水压力作用下，层间错动带的变形强度特性如何，目前还不得而知，并且也无类似研究成果可以借鉴。因此，本文拟采用新研发的 HMSS-300 型现场结构面水力耦合直剪试验系统[31]，对溪洛渡水电站的层间错动带开展水力耦合直剪试验，探讨层间错动带水力耦合抗剪强度特性的演化规律。

2 层间错动带物质组构特征

本次试验研究所采用的层间错动带试件，取自溪洛渡大坝右岸 ADR7 排水廊道，该层间错动带埋深约为 350 m，主错带厚一般为 1～5 cm，两侧岩体较破碎，影响带厚为 20～40 cm（见图 1）。层间错动带上下盘岩体为含斑玄武岩，深灰至灰黑色，块状和杏仁状构造，少量长石斑晶，成分主要为微晶斜长石（50%～60%）、次为单斜辉石（20%～25%）、火山玻璃（15%～20%）、少量磁铁矿。层间错动带物质组成以中、细角砾为主，主要矿物成分为辉石（3.8%～34.3%）、绿泥石（13.9%～28.3%）、长石类矿物（28%～50.6%）、方解石（4.5%～20%）和蒙脱石（0～17.2%）。

根据室内试验，层间错动带天然密度为 2.35～2.53 g/cm^3，含水率为 5%～9%，孔隙比为 0.19～0.28，饱和度为 77%～89%。根据筛分结果，测得粗砾含量（20 mm＜d≤60 mm（d 为粒径））为 13.9%～24.51%，中砾含量（5 mm＜d≤20 mm）为

40.43%～52.92%，细砾含量（2 mm＜d≤5 mm）为17.53%～20.61%，砂粒含量（0.075 mm＜d≤2.000 mm）为13.53%～13.83%，粉粒含量（d≤0.075 mm）为0.92%～1.82%。不均匀系数为11～14，曲率系数为1.03～1.65，级配良好。典型C4-1、C4-2样品的颗粒级配曲线如图2所示。



图 1　层间错动带
Fig.1　Interlayer dislocation zone

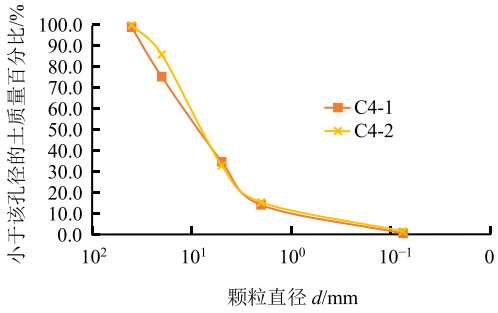


图 2　层间错动带颗粒级配典型曲线
Fig.2　Typical grading curves of interlayer dislocation zone

3　层间错动带现场水力耦合直剪试验

3.1　试验设备

层间错动带水力耦合直剪试验采用长江科学院新研发的HMSS-300型现场结构面水力耦合直剪试验系统（见图3），该系统主要由高水压密封试验舱、法向与剪切荷载加载与反力装置、试验舱充水与水压力加载装置、耐高水压力变形测量系统、试验荷载与水压力伺服控制系统等组成。

HMSS-300型现场结构面水力耦合直剪试验系统主要指标参数为：

（1）试件尺寸为50 cm×50 cm×50 cm；

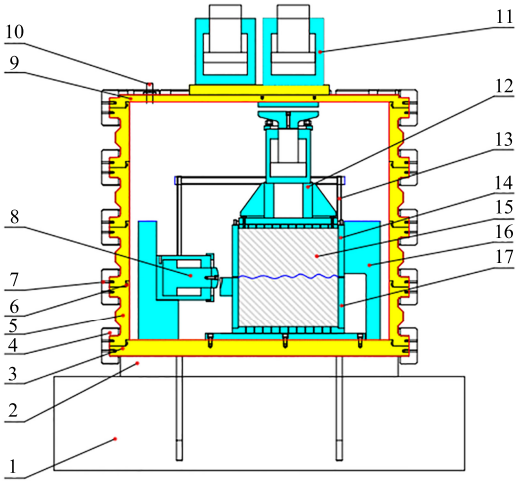
（2）最大法向载荷为3 000 kN；

（3）最大水平载荷为1 500 kN；

（4）最大水压力为3 MPa；

（5）变形传感器量程为±30 mm，线性度<0.05%，分辨率为0.001 mm，耐水压力为5 MPa。

HMSS-300型现场结构面水力耦合直剪试验系统具备3 MPa（300 m级大坝水头）高压水环境模拟功能，可实现岩体或结构面在不同的水压力–应力耦合作用下的剪切变形特性与抗剪强度特征研究。



1－混凝土地基；2－密封舱底座钢垫板；3－密封舱钢底板；4－卡扣；5－密封舱筒；6－密封圈；7－卡扣固定螺栓；8－水平力加载组件；9－密封舱盖板；10－排气孔；11－舱外千斤顶；12－法向力加载组件；13－变形测量支架；14－上剪切盒；15－试件；16－水平力加载反力装置；17－下剪切盒

图 3　HMSS-300 试验系统结构示意图
Fig.3　Schematic diagram for the structure of test system HMSS-300

3.2　试件制备

在现场确定层间错动带水力耦合直剪试验试件的取样位置后，按照以下步骤完成试件的制备：

（1）以平硐侧壁上出露的层间错动带为中线，划定55 cm×55 cm取样范围，并沿周线钻连环孔，连环孔孔深约70 cm；

（2）对试件前端面与四周切割平整，上下两个端面插入固定钢板，塞入紧固盘条，固定上下定位钢板，防止层间错动带松动；

（3）对试件后端面进行侧向连环钻孔，并切割平整，制备成型为50 cm×50 cm×50 cm试件（见图4）；

（4）将制备成型的试件整体放入剪切盒内，并浇筑混凝土或水泥砂浆保护套，上下两剪切盒之间预留剪切缝，养护完成后再整体安装至试验舱内。

3.3　试验方案

根据层间错动带埋深及所处的地应力环境，层间错动带在实际中受到约束，承受的法向荷载约为

6～7 MPa。当制备层间剪切带试件开展直剪试验时，错动带四周因无约束，避免法向加载过程中层间错动带的物质挤出破坏，设定试件的法向荷载最大不超过 5.0 MPa。为了分析水压力对层间错动带抗剪强度特性的影响，直剪试验过程中水压力分别设定为 1.0 MPa 和 2.0 MPa。各试件水力耦合直剪试验荷载的施加方案具体如表 1 所示。



图 4 层间错动带试件制备

Fig.4 Specimen preparation of interlayer dislocation zone

表 1 水力耦合直剪试验荷载施加方案

Table 1 Loading schemes for direct shear test under hydro-mechanical coupling conditions

组号	水压力σ_w/MPa	有效法向应力σ_n/MPa
S2-1	1.0	1.35
S2-2	1.0	2.03
S2-3	1.0	2.51
S2-4	1.0	3.00
S2-5	1.0	5.00
S3-1	2.0	2.53
S3-2	2.0	3.00
S3-3	2.0	3.47
S3-4	2.0	4.00
S3-5	2.0	4.75

3.4 试验步骤

试验过程参照《水利水电工程岩石试验规程》（SL264—2020）[32] 7.2 节结构面直剪试验相关条文执行。具体试验步骤如下：

（1）将含有试件的剪切盒吊装至高水压密封试验舱内，安放至底板卡槽内，并拆除紧固盘条。

（2）依次安装水平力加载组件、法向力加载组件，调试平稳后，安装调试变形测量支架与水平位移、法向位移测表。

（3）安装高水压密封舱盖板及舱外千斤顶、传立柱等反力设备。

（4）连接控制系统，为高水压密封试验舱充水，充满后利用水压力加载伺服控制系统，施加水压力至预定值，并保持不变。

（5）分 3 级施加法向荷载，每隔 5 min 施加一级，并测读法向位移。在最后一级法向荷载作用下，每隔 10 min 测读一次，连续两次读数之差不超过 0.03 mm 后，即认为法向位移相对稳定，再施加剪切荷载。

（6）按预估最大剪切载荷的 10%施加剪切载荷，当加荷后引起的剪切位移超过前级位移值的 1.5 倍时，剪切载荷减半施加，直至破坏，加压后稳定 5 min 测读一次剪切位移和法向位移。在整个施加剪应力过程中保持法向荷载和试验舱内水压力不变。

（7）试体剪断后，依次将剪切荷载、法向荷载缓慢退至 0，利用水平加载组件将试件复位，在同等法向荷载和水压力下，再按步骤（5）和步骤（6）进行剪断面的抗剪试验。

（8）试验结束后对剪断面进行描述，并确定有效剪切面积。

（9）绘制各法向应力下剪切应力 与剪切位移及法向位移的关系曲线。根据关系曲线，确定各有效法向应力下抗剪断峰值强度和抗剪峰值强度。根据有效法向应力与其对应的抗剪断峰值强度和抗剪峰值强度，绘制了剪应力与有效法向应力关系曲线，并确定相应的抗剪强度参数。

3.5 试验结果

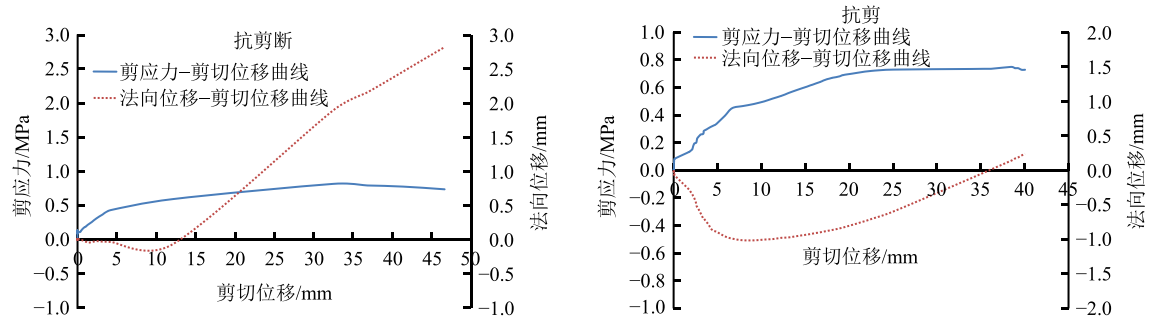
层间错动带试件在水压力−应力耦合作用下的剪应力与剪切位移和法向位移关系曲线如图 5、6 所示。根据试验曲线可得：

（1）1.0 MPa 水压力作用下层间错动带的抗剪断破坏过程具有明显的峰值，峰值过后其剪切位移快速增加，抗剪强度相应降低并趋于稳定。

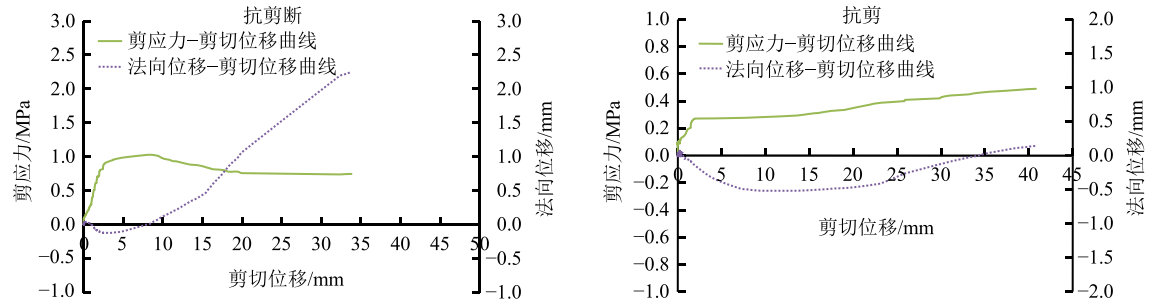
（2）在 2.0 MPa 水压力环境下，当法向荷载较低时，层间错动带的抗剪断破坏过程具有明显的峰值，峰值过后其剪切位移快速增加，抗剪强度相应降低并趋于稳定达；但是，随着法向荷载增加，层间错动带试件抗剪断破坏过程的峰值则越来越不明显。

（3）层间错动带抗剪断后，其在 1.0、2.0 MPa 水压力环境下的抗剪曲线均没有明显的峰值，在整个剪切过程中，抗剪强度逐渐增大并趋于稳定。

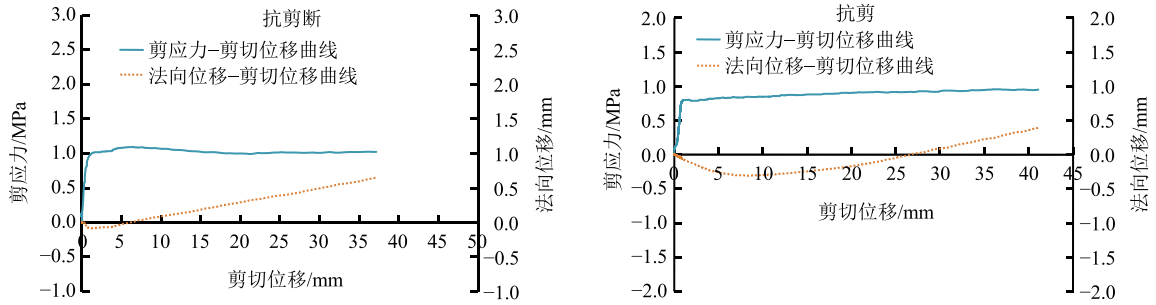
（4）在水力耦合条件下，层间错动带的直剪破坏过程，法向位移大多表现出先剪胀后剪缩的特征，并且剪胀现象基本上发生于抗剪峰值强度之前，层间错动带达到抗剪峰值强度之后，法向位移以剪缩为主。并且，随着法向应力增大，层间错动带水力耦合直剪过程中表现出的剪胀效应逐渐减弱，即法向应力对层间错动带的剪胀效应具有抑制作用。



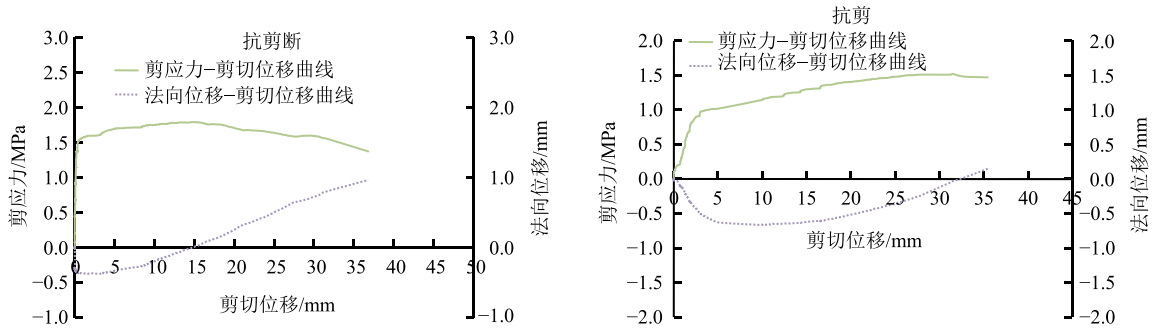
(a) S2-1(σ_n = 1.35 MPa)



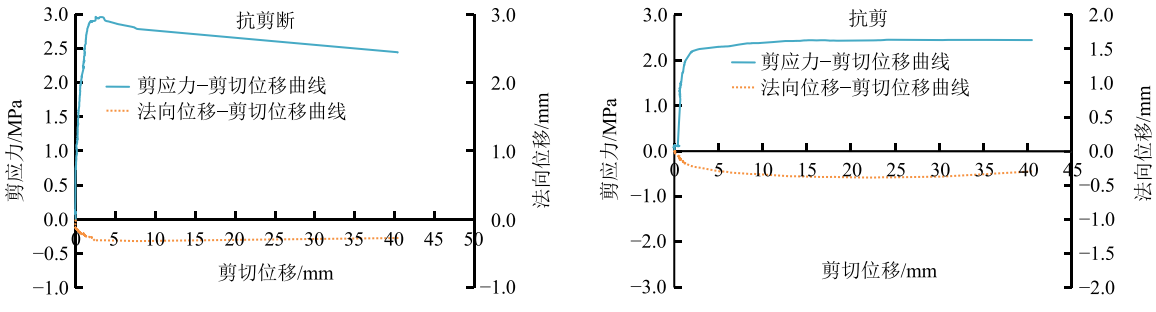
(b) S2-2(σ_n = 2.03 MPa)



(c) S2-3(σ_n = 2.51 MPa)



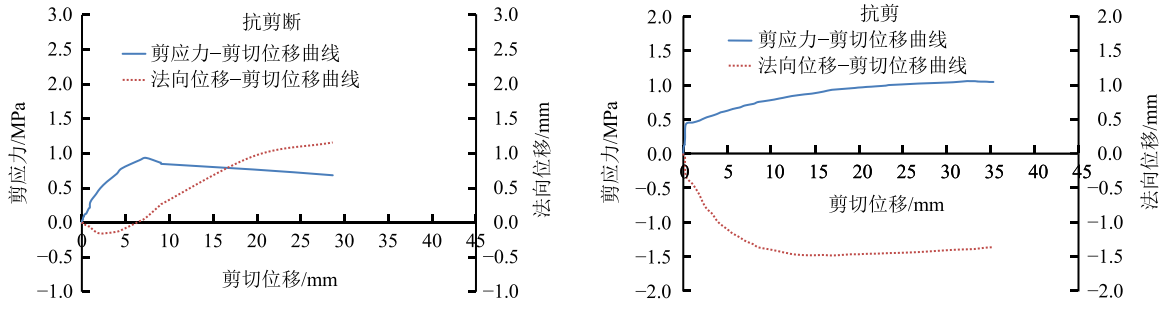
(d) S2-4(σ_n = 3.00 MPa)



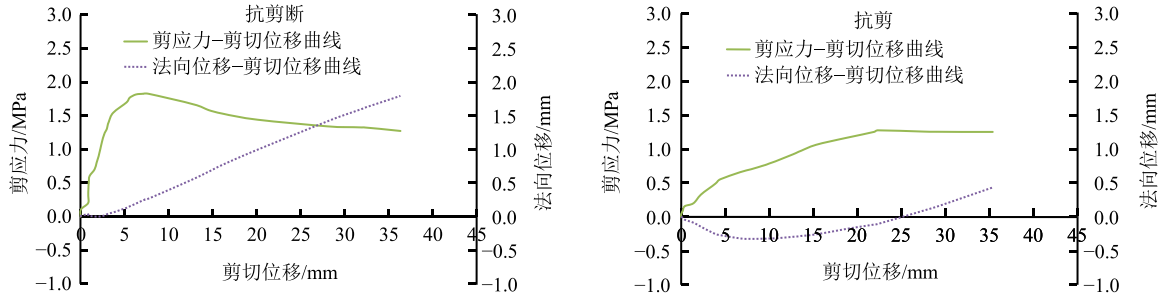
(e) S2-5(σ_n = 5.00 MPa)

图 5　1.0 MPa 水压力作用下层间错动带直剪试验曲线

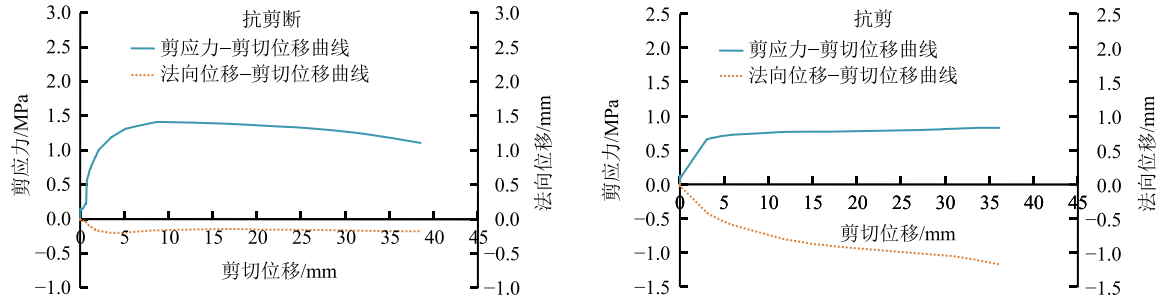
Fig.5　Direct shear test curves of interlayer dislocation zone specimens under water pressure of 1.0 MPa



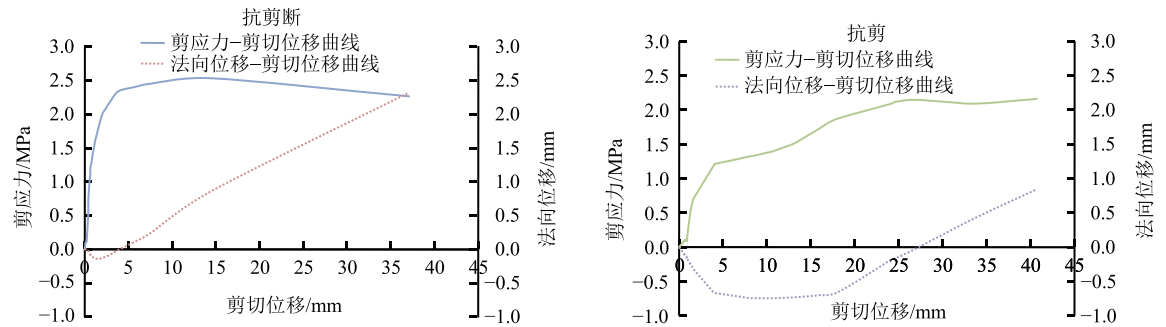
(a) S3-1(σ_n = 2.53 MPa)



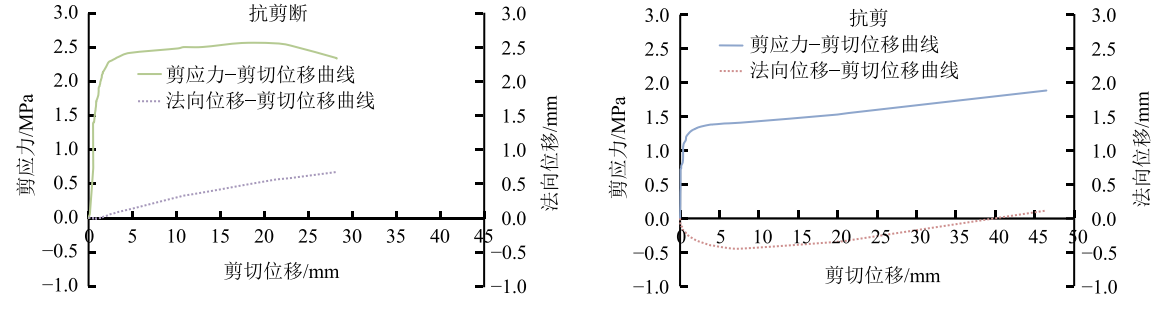
(b) S3-2(σ_n = 3.00 MPa)



(c) S3-3(σ_n = 3.47 MPa)



(d) S3-4(σ_n = 4.00 MPa)



(e) S3-5(σ_n = 4.75 MPa)

图 6 2.0 MPa 水压力作用下层间错动带直剪试验曲线

Fig.6 Direct shear test curves of interlayer dislocation zone specimens under water pressure of 2.0 MPa

4　层间错动带水力耦合抗剪强度特性演化规律

4.1　层间错动带水力耦合直剪强度特征

根据 S2 和 S3 组试件的水力耦合直剪试验曲线，获得层间错动带的抗剪断峰值强度与抗剪峰值强度如表 2 所示。层间剪切带试件在不同水力耦合条件下的抗剪断峰值强度和抗剪峰值强度与有效法向应力关系曲线如图 7、8 所示。根据试验结果可得：

（1）层间错动带试件在水力耦合条件下，有效法向应力越高，其抗剪断峰值强度与抗剪峰值强度也越高。

（2）水力耦合条件下，层间错动带试件的抗剪断峰值强度和抗剪峰值强度与有效法向应力近似呈直线关系，可采用摩尔–库仑强度准则表示：

$$\tau = \sigma_{\mathrm{n}}' \tan\varphi' + c' \tag{1}$$

$$\tau' = \sigma_{\mathrm{n}}' \tan\varphi'' + c'' \tag{2}$$

式中：τ 为抗剪断峰值强度；σ_{n}' 为有效法向应力；φ' 为有效抗剪断强度参数内摩擦角；c' 为有效抗剪断强度参数黏聚力；τ' 为抗剪峰值强度；φ'' 为有效抗剪强度参数内摩擦角；c'' 为有效抗剪强度参数黏聚力。

（3）对于本次层间错动带的水力耦合直剪试验结果，本文采用点群中心法确定其抗剪强度参数。将不同的剪应力与其对应的有效法向应力绘于直角坐标系，画斜线使两边的试验点数大体相等，则该斜线的斜率即为摩擦系数 $\tan\varphi$，再根据斜线在纵坐标轴上的截距定出黏聚力 c 值。利用上述方法获得 1.0 MPa 水压力耦合作用下，层间错动带 S2 组试件抗剪断的有效内摩擦角 φ' 值为 26.1°，有效黏聚力 $c' = 0.25$ MPa，抗剪有效内摩擦角 $\varphi'' = 24.2°$，有效黏聚力 $c'' = 0.04$ MPa。2.0 MPa 水压力耦合作用下，层间错动带 S3 组试件的抗剪断有效内摩擦角 $\varphi' = 25.2°$，有效黏聚力 $c' = 0.21$ MPa；抗剪有效内摩擦角 $\varphi'' = 21.3°$，有效黏聚力 $c'' = 0.02$ MPa。

表 2　层间错动带水力耦合直剪峰值强度及抗剪强度参数

Table 2　Peak strengths and shear strength parameters of interlayer dislocation zone in direct shear tests under hydro-mechanical coupling conditions

试件组号	试件编号	水压力（含水状态）/MPa	有效法向应力/MPa	抗剪断峰值强度/MPa	有效抗剪断强度参数		抗剪峰值强度/MPa	有效抗剪强度参数	
					φ'/(°)	c'/MPa		φ''/(°)	c''/MPa
τ45-5	τ45-5-1	天然	1.00	1.22	28.4	0.57	1.22	27.9	0.55
	τ45-5-2		3.09	2.04			1.98		
	τ45-5-3		4.11	2.44			2.31		
	τ45-5-4		1.97	1.97			1.97		
	τ45-5-5		4.84	3.43			3.43		
τ69-2	τ69-2-1	饱和	3.10	1.55	27.9	0.37	1.43	27.5	0.29
	τ69-2-2		1.90	0.93			0.93		
	τ69-2-3		0.57	0.54			0.47		
	τ69-2-4		2.19	0.97			0.97		
	τ69-2-5		1.08	0.59			0.56		
S2	S2-1	1.0	1.35	0.82	26.1	0.25	0.75	24.2	0.04
	S2-2		2.03	1.03			0.49		
	S2-3		2.51	1.02			0.95		
	S2-4		3.00	1.79			1.51		
	S2-5		5.00	2.96			2.45		
S3	S3-1	2.0	2.53	0.93	25.2	0.21	0.81	21.3	0.02
	S3-2		3.00	1.83			1.27		
	S3-3		3.47	1.41			0.83		
	S3-4		4.00	2.53			2.16		
	S3-5		4.75	2.57			1.88		

4.2　层间错动带抗剪强度参数的水力耦合劣化特征

为了综合研究不同水力耦合条件下层间错动带的抗剪强度特性的劣化规律，甄选溪洛渡水电站勘察阶段，坝址区岩体力学特性与取值研究专题研究工作中开展的相应层位的层间错动带在天然和饱水状态下的原位直剪试验结果[33]（见表 2），与本文开展的 1.0、2.0 MPa 水压力作用下的直剪试验结果进行对比研究，分析可得：

（1）天然状态下层间错动带的抗剪断强度参数，内摩擦角为 28.4°，黏聚力为 0.57 MPa；抗剪强度参

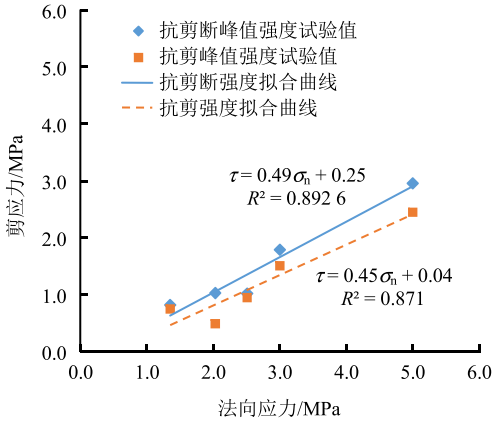


图 7 1 MPa 水压力下 S2 组试件峰值强度拟合曲线

Fig.7 Fitting curves of peak strength of group S2 specimens under water pressure of 1 MPa

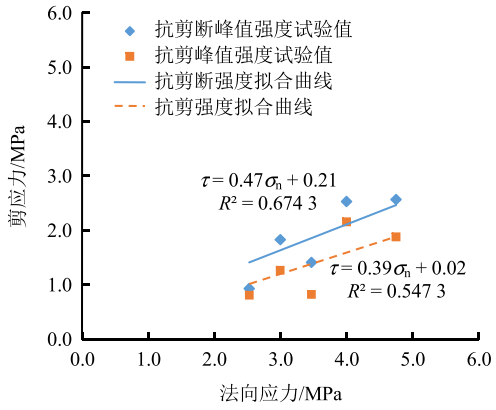


图 8 2 MPa 水压力下 S3 组试件峰值强度拟合曲线

Fig.8 Fitting curves of peak strength of group S3 specimens under water pressure of 2 MPa

数，内摩擦角为 27.9°，黏聚力为 0.55 MPa。饱水状态下，层间错动带的抗剪断强度参数，内摩擦角为 27.9°，黏聚力为 0.37 MPa；抗剪强度参数内摩擦角为 27.5°，黏聚力为 0.29 MPa。

（2）层间错动带饱和状态下的内摩擦角比天然状态下的内摩擦角略有降低，但相差不大；而饱和状态下的黏聚力则比天然状态下的黏聚力明显降低，劣化程度可达 35%～47%。

（3）在水力耦合作用下，层间错动带的有效内摩擦角随水压力的升高而降低，二者近似呈负指数关系（见图 9）：

$$\varphi' = 27.79\,\mathrm{e}^{-0.052\sigma_w} \tag{3}$$

$$\varphi'' = 27.50\,\mathrm{e}^{-0.127\sigma_w} \tag{4}$$

式中：σ_w 为水压力。当 $\sigma_w = 0$ 时，φ' 即为饱和状态的抗剪断内摩擦角，φ'' 为饱和状态的抗剪内摩擦角。

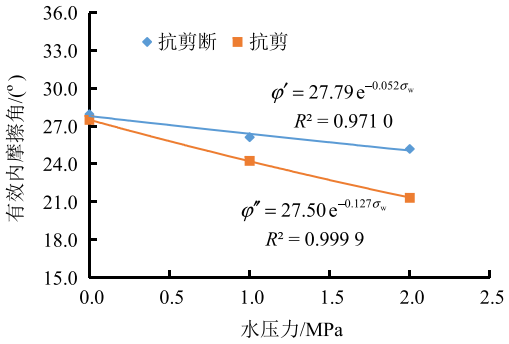


图 9 有效内摩擦角随水压力的变化规律

Fig.9 Relationships between effective internal friction angle and water pressure

（4）在水力耦合作用下，层间错动带的有效黏聚力也随水压力的升高而降低，二者同样可用负指数函数表示（见图 10）：

$$c' = 0.37\,\mathrm{e}^{-0.31\sigma_w} \tag{5}$$

$$c'' = 0.29\,\mathrm{e}^{-1.47\sigma_w} \tag{6}$$

当水压力 $\sigma_w = 0$ 时，c' 即为饱和状态的抗剪断黏聚力，c'' 为饱和状态的抗剪黏聚力。

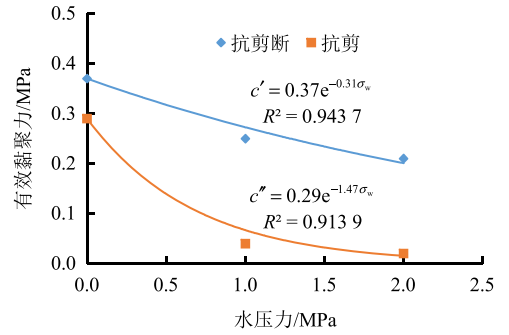


图 10 有效黏聚力随水压力的变化规律

Fig.10 Relationships between effective cohesion and water pressure

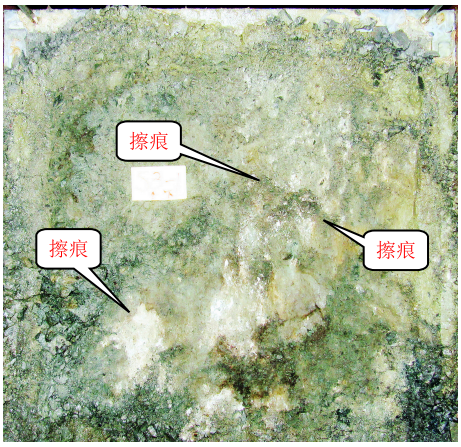
（5）在 0～2.0 MPa 水压力条件下，层间错动带有效内摩擦角劣化程度为 7%～22%，有效黏聚力的劣化程度为 32%～93%，表明水压力的增加对层间错动带有效黏聚力的不利影响更加明显。

（6）综上所述，层间错动带天然含水率为 5%～9%，饱和度为 77%～89%。当层间错动带遇水饱和后，含水率提高为 9.4%～12.4%，其有效内摩擦角比天然状态下的内摩擦角略有降低，但有效黏聚力则劣化明显，其中抗剪断有效黏聚力降低 35.1%，抗剪有效黏聚力降低 47.3%；当层间错动带遇水饱和并处于 1.0 MPa 水压力环境下，其抗剪断有效内摩擦角比天然状态下的内摩擦角降低 9.3%，抗剪有

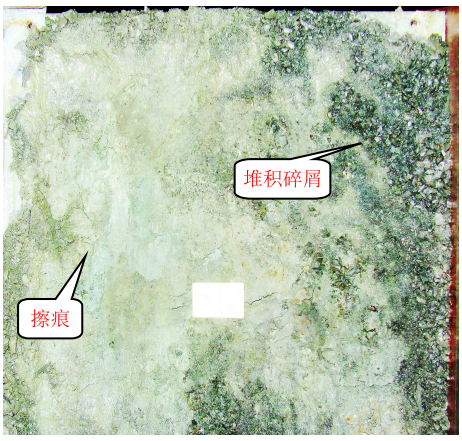
效内摩擦角降低 15.1%，而有效黏聚力则进一步降低，其中抗剪断有效黏聚力的降低程度达到 56.1%，抗剪有效黏聚力降低程度达到 92.7%；当层间错动带处于 2.0 MPa 水压力环境下时，其抗剪断有效内摩擦角比天然状态下的内摩擦角降低约 13.0%，抗剪有效内摩擦角降低约 26.4%，抗剪断有效黏聚力的降低程度则达到 63.2%，抗剪有效黏聚力的降低程度达到 96.4%。

4.3　层间错动带水力耦合直剪破坏特征

层间错动带水力耦合直剪切试验的典型剪切破坏面形态如图 11 所示。在不同的水压力–法向荷载耦合作用下层间错动带呈现出中、细角砾岩的剪切滑移破坏模式与颗粒的剪断–滑移混合破坏模式。



(a) S3-1



(b) S3-5

图 11　破坏面典型照片
Fig.11　Photos of typical failure surfaces

当有效法向荷载较小时，如图 11(a)中 S3-1 试件（σ'_n = 2.53 MPa）所示，试件沿错动带与下盘接触面剪断，破坏面上碎屑较少，破坏面上具有明显的剪切滑移痕迹，表明层间错动带以剪切滑移破坏模式为主。

当有效法向荷载较高时，如图 11(b)中 S3-5 试件（σ'_n = 4.75 MPa）所示，试件沿错动带与下盘接触面剪断，剪切带破碎成碎屑，呈散体状堆积在下盘，同时局部仍可见滑移擦痕，层间错动带破坏面上砾岩颗粒破碎程度较高，呈片状。取破坏面上层间错动带碎屑进行室内颗分试验，结果如图 12 所示。对比分析试验前层间错动带颗粒分析试验结果可以发现，水力耦合直剪破坏后，破坏面上层间错动带中砾含量（5 mm＜d≤20 mm）含量明显减低，为 34.9%，砂粒含量（0.075 mm＜d≤2.000 mm）明显增多，达到 30.6%。表明由于有效法向荷载的限制，剪切带颗粒虽可以产生局部移动，但无法产生整体推移，层间错动带所含部分砾石颗粒因无法抵剪切力而发生剪断破坏，粗颗粒含量减少，细颗粒含量增加，从而有利于破坏面贯通并发生剪切滑移。

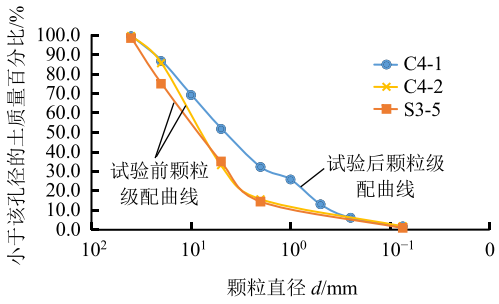


图 12　试验前后层间错动带颗粒级配典型曲线
Fig.12　Typical grading curves of interlayer dislocation zone before and after the test

5　层间错动带抗剪强度参数的水力耦合影响机制分析

层间错动带抗剪强度特征的影响因素可分为内因和外因两个方面，其中内因包括层间错动带的矿物组成、颗粒的结合程度与自身的结构等，外因包括含水率、水压力环境等。结合层间错动带在本次直剪试验研究中水力耦合的作用过程，对其抗剪强度特征的劣化机制进行分析。

首先是层间错动带遇水饱和后因软化作用导致其抗剪强度参数降低。根据层间错动带矿物成分的 X 射线衍射图谱（见图 13）可知，其主要矿物成分为辉石、绿泥石和长石类矿物。其中蒙脱石、绿泥石等黏土矿物亲水性较强且含量较高，在 25.6%～36.6%之间（见表 3）。当层间错动带遇水后，黏土矿物与水接触，表面的颗粒晶片吸水，形成水化膜。随着吸水量的增加，矿物表面产生泥化，并且水分子进入黏土矿物结构单元的层间区域，矿物颗粒产生膨胀，同时矿物颗粒间胶结作用的黏结力很小，易受水的作用，与水分子及其中的离子形成氢键作

用，颗粒分散，层间错动带强度降低。此外，层间错动带扫描电镜可分辨矿物的形态如图 14 所示，其中蒙脱石呈现蜂窝状、丝絮状等，绿泥石呈片状，颗粒间的孔隙率较高，水进入层间错动带的孔隙后产生的静水压力以及密闭在空隙中的空气所产生的张力将进一步减弱颗粒间的连接作用。上述影响机制在宏观上即表现为，层间错动带饱和状态下的抗剪强度参数内摩擦角比天然状态下的内摩擦角略有降低，以及饱和状态下的黏聚力则比天然状态下的黏聚力降低 35%～47%。

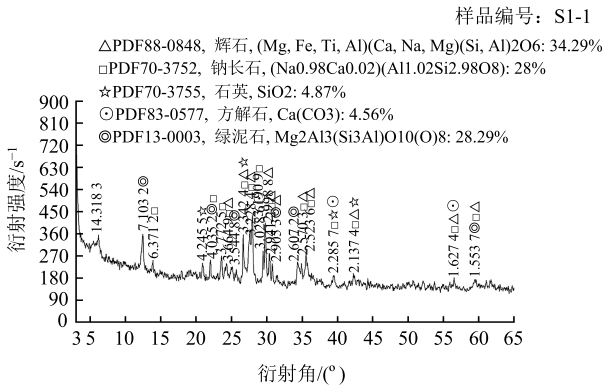


图 13 层间错动带矿物成分衍射图谱

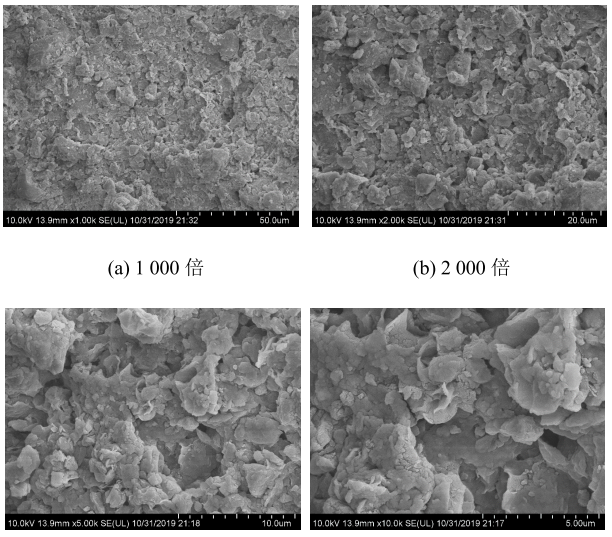
Fig.13 Diffraction pattern of mineral composition of interlayer dislocation zone

表 3 层间错动带矿物成分

Table 3 Mineral composition of interlayer dislocation zone

矿物名称	矿物成份/%		
	S2-1	S2-2	S2-3
普通辉石	34.3	17.9	3.8
绿泥石	28.3	19.4	13.9
石英	4.9	—	—
斜长石	—	15.8	42.8
钠长石	28.0	—	—
钾长石	—	19.7	7.8
方解石	4.5	10.0	20.0
蒙脱石	—	17.2	11.7
伊利石	—	—	—

其次，当层间错动带饱和后并处于一定的水压力环境中时（例如水压力σ_w = 1.0 MPa），相较于饱和状态下的层间错动带，在水压力的作用下，水分子进一步侵入颗粒之间。此时，可将层间错动带近似为黏结紧密的散块体结构，依据泰沙基有效应力原理，散块体体积变形和抗剪强度的变化，决定于作用在散体骨架上的有效应力。孔隙水压力增加，层间错动带有效应力降低（散块体颗粒间的法向作用力降低），表现为层间错动带在水压力作用下，黏聚力和内摩擦角均减小。在本次试验结果中具体反映为 0～2.0 MPa 水压力条件下，层间错动带有效内摩擦角减小了 7%～22%，有效黏聚力减小了 32%～93%。



(a) 1 000 倍 (b) 2 000 倍

(c) 5 000 倍 (d) 10 000 倍

图 14 层间错动带扫描电镜微观结构图

Fig.14 SEM microstructures of interlayer dislocation zone

6 结 论

（1）本次试验研究选取的层间错动带主错带厚 1～5 cm，物质组成以中、细角砾为主，颗粒周围分布有一定数量的次生泥。其不均匀系数为 11～14，曲率系数为 1.03～1.65，级配良好。

（2）水力耦合作用下，层间错动带的抗剪断破坏过程具有明显的峰值，峰值过后其剪切位移快速增加，剪切强度相应降低并趋于稳定。在此过程中，其法向位移大多表现出先剪胀后剪缩的特征，并且随着法向应力增大，层间错动带水力耦合直剪过程中表现出的剪胀效应逐渐减弱。

（3）在水力耦合作用下，层间错动带的有效内摩擦角随水压力的升高而降低，二者呈负指数关系；有效黏聚力也随水压力的升高而降低，二者同样呈负指数关系。在 0～2.0 MPa 水压力条件下，层间错动带有效内摩擦角劣化程度为 7%～22%，有效黏聚力的劣化程度为 32%～93%，表明水力耦合作用下，水压力的增加对层间错动带的有效黏聚力的影响更加明显。

（4）在不同法向荷载−水压力耦合作用下层间错动带呈现出剪切滑移破坏模式与中、细角砾岩颗粒的剪断−滑移混合破坏模式。

（5）在水力耦合条件下，一方面因蒙脱石、绿泥石等黏土矿物遇水软化、膨胀而弱化了固体骨架

的强度，另一方面因水侵入层间错动的颗粒之间以及黏土矿物的结构单位层之间，形成较厚的水分子层，减小了层间错动带颗粒间的摩擦系数与表面张力，从而导致层间错动带的抗剪强度参数内摩擦角和黏聚力产生随着水压力的增加而降低的演化特征。

参 考 文 献

[1] MÜLLER L. The rock slide in the Vajont Valley[J]. **Rock Mechanics and Engineering Geology**, 1964, 2(3): 148-212.

[2] JAEGER C. The Malpasset report[J]. **Water Power**, 1963, 15(2): 55-56.

[3] 邬爱清, 丁秀丽, 李会中, 等. 非连续变形分析方法模拟千将坪滑坡启动与滑坡全过程[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(7): 1297-1303.
WU Ai-qing, DING Xiu-li, LI Hui-zhong, et al. Numerical simulation of startup and whole failure process of Qianjiangping landslide using discontinuous deformation analysis method[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2006, 25(7): 1297-1303.

[4] 唐良琴, 聂德新, 任光明. 软弱结构面粒度成分与抗剪强度参数的关系探讨[J]. 工程地质学报, 2003, 11(2): 143-147.
TANG Liang-qin, NIE De-xin, REN Guang-ming. Discussion of the relationship between granulometric composition and shear strength parameter of weak structural plane[J]. **Journal of Engineering Geology**, 2003, 11(2): 143-147.

[5] 江权, 冯夏庭, 周辉, 等. 层间错动带的强度参数取值探讨[J]. 岩土力学, 2011, 32(11): 3379-3386.
JIANG Quan, FENG Xia-ting, ZHOU Hui, et al. Discussion of strength value for interlayer shear belt[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 32(11): 3379-3386.

[6] 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(增刊 1): 2692-2703.
XU Ding-ping, FENG Xia-ting, CUI Yu-jun, et al. Shear behaviors of interlayer staggered zone at Baihetan hydropower station[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2012, 31(Suppl.l): 2692-2703.

[7] XU D P, FENG X T, CUI Y J. A simple shear strength model for interlayer shear weakness zone[J]. **Engineering Geology**, 2012, 147-148: 114-123.

[8] XU D P, FENG X T, CUI Y J. An experimental study on the shear strength behaviour of an interlayered shear weakness zone[J]. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, 2013, 72(3-4): 327-338.

[9] 赵阳, 周辉, 冯夏庭, 等. 高压力下原状层间错动带三轴不排水剪切特性及其影响因素分析[J]. 岩土力学, 2013, 34(2): 365-371.
ZHAO Yang, ZHOU Hui, FENG Xia-ting, et al. Undrained shear behaviour of intact infilled joint soil with triaxial shear tests under high pressure and its influence factor analysis[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2013, 34(2): 365-371.

[10] 史存鹏, 冯夏庭, 江权, 等. 白鹤滩层间错动带微结构特性及其化学改性初探[J]. 岩土力学, 2013, 34(5): 1287-1292.
SHI Cun-peng, FENG Xia-ting, JIANG Quan, et al. Preliminary study of microstructural properties and chemical modifications of interlayer shear weakness zone in Baihetan[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2013, 34(5): 1287-1292.

[11] 段淑倩, 冯夏庭, 江权, 等. 高应力条件下错动带加卸荷力学特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(6): 1090-1101.
DUAN Shu-qian, FENG Xia-ting, JIANG Quan, et al. Failure modes and mechanisms for rock masses with staggered zones of Baihetan underground caverns under high geostress[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2016, 35(6): 1090-1101.

[12] 韩钢, 周辉, 陈建林, 等. 白鹤滩水电站层间错动带工程地质特性[J]. 岩土力学, 2019, 40(9): 3559-3568, 3575.
HAN Gang, ZHOU Hui, CHEN Jian-lin, et al. Engineering geological properties of interlayer staggered zones at Baihetan hydropower station[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2019, 40(9): 3559-3568, 3575.

[13] HAN G, ZHOU H, HOU J, et al. A comprehensive investigation on the shear properties of interlayer shear weakness zones[J]. **Bulletin of Engineering Geology and the Environmen**t, 2021, 80: 8765-8787.

[14] 张春生, 沈俊良, 褚卫江, 等. 大型贯穿层间错动带尺寸效应研究[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(8): 1564-1570.
ZHANG Chun-sheng, SHEN Jun-liang, CHU Wei-jiang, et al. Size effects of large penetrable bedding fault zone[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2020, 42(8): 1564-1570.

[15] FISHMAN Y A. Shear resistance along rock mass discontinuities: results of large-scale field tests[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2004, 41(6):1029-1034.

[16] INDRARATN B, OLIVEIRA D A F, BROWN E T. A shear-displacement criterion for soil-infilled rock discontinuities[J]. **Geotechnique**, 2010, 60(8): 623-633.

[17] INDRARATNA B, PREMADASA W, BROWN E T, et al. Shear strength of rock joints influenced by compacted

infill[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2014, 70: 296-307.

[18] JAHANIAN H, SADAGHIANI M H. Experimental study on the shear strength of sandy clay infilled regular rough rock joints[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2015, 48(3): 907-922.

[19] 李天一, 徐进, 王璐, 等. 高孔隙水压力作用下岩体软弱结构面(带)力学特性的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(增刊 2): 3936-3941.
LI Tian-yi, XU Jin, WANG Lu, et al. Experimental research on mechanical characteristics of weak structural plane(zone) under high pore water pressure[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2012, 31(Suppl.2): 3936-3941.

[20] 许江, 邬君宇, 刘义鑫, 等. 不同充填度下岩体剪切−渗流耦合试验研究[J]. 岩土力学, 2019, 40(9): 1-11.
XU Jiang, WU Jun-yu, LIU Yi-xin, et al. Experimental study on shear-seepage of coupled properties for rock mass under different filling degrees[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2019, 40(9): 1-11.

[21] 张亮, 顾琳琳, 时伟, 等. 单节理结构面试件在渗流状态下抗剪强度研究[J]. 青岛理工大学学报, 2019, 40(3): 24-29.
ZHANG Liang, GU Lin-lin, SHI Wei, et al. Research on shear strength of single joint structural specimen in seepage flow state[J]. **Journal of Qingdao University of Technology**, 2019, 40(3): 24-29.

[22] 唐林, 吴道勇, 韦洪, 等. 软弱夹层含水率对岩体抗剪强度影响机制试验研究[J]. 水力发电, 2021, 47(10): 116-122.
TANG Lin, WU Dao-yong, WEI Hong, et al. Experimental study on the influence mechanism of water content in weak interlayer on the shear strength of rock mass[J]. **Water Power**, 2021, 47(10): 116-122.

[23] ESAKI T, DU S, MITANI Y, et al. Development of a shear-flow test apparatus and determination of coupled properties for a single rock joint[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 1999, 36(5): 641-650.

[24] OLSSON R, BARTON N. An improved model for hydro-mechanical coupling during shearing of rock joints[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2001, 38(3): 317-329.

[25] LEE H S, CHO T F. Hydraulic characteristics of rough fractures in linear flow under normal and shear load[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2002, 35(4): 299-318.

[26] LI B, JIANG Y J, KOYAMAD T, et al. Experimental study of the hydro-mechanical behavior of rock joints using a parallel-plate model containing contact areas and artificial fractures[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2008, 45(3): 362-375.

[27] 王刚, 蒋宇静, 王渭明, 等. 新型数控岩石节理剪切渗流试验台的设计与应用[J]. 岩土力学, 2009, 30(10): 3200-3208.
WANG Gang, JIANG Yu-jing, WANG Wei-ming, et al. Development and application of an improved numeric control shear-fluid coupled apparatus for rock joint[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(10): 3200-3208.

[28] 尹立明, 陈军涛. 渗透水压对节理应力−渗流耦合特性的影响试验研究[J]. 岩土力学, 2013(9): 2563-2568.
YIN Li-ming, CHEN Jun-tao. Experimental study of influence of seepage pressure on joint stress-seepage coupling characteristics[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2013, 34(9): 2563-2568.

[29] PARK H, OSADA M, MATSUSHITA T, et al. Development of coupled shear-flow-visualization apparatus and data analysis[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2013, 63: 71-81.

[30] 夏才初, 钱鑫, 桂洋, 等. 多功能岩石节理全剪切−渗流耦合试验系统研制与应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(10): 16-28.
XIA Cai-chu, QIAN Xin, GUI Yang, et al. A novel multi-functional shear-flow coupled test system for rock joints and its application[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2018, 37(10): 16-28.

[31] WU A, FAN L, FU X, et al. Design and application of hydro-mechanical coupling test system for simulating rock masses in high dam reservoir operations[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2021, 140: 104638.

[32] 长江水利委员会长江科学院. SL/T264−2020 水利水电工程岩石试验规程[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2020.
Changjiang River Scientific Research Institute of Changjiang Water Resources Commission. SL264−2020 Code for rock test in water and hydropower projects[S]. Beijing: China Water & Power Press, 2020.

[33] 雷泽宏. 金沙江溪洛渡水电站可行性研究报告/专题报告十五/岩体力学特性及取值研究[R]. 成都: 国家电力公司成都勘测设计研究院, 2001.
LEI Ze-hong. Feasibility study report of Xiluodu hydropower station on Jinsha River/ special report XV/ study on mechanical characteristics and value of rock mass[R]. Chengdu: Chengdu Engineering Corporation Limited, State Power Corporation, 2001.