

文章编号: 1000—7598 (2013) 05—1287—06

白鹤滩层间错动带微结构特性 及其化学改性初探

史存鹏, 冯夏庭, 江 权, 徐鼎平

(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, 武汉 430071)

摘 要: 白鹤滩水电站层间错动带结构疏松、性状软弱、空间展布范围大、力学强度低, 严重影响着地下厂房洞室的稳定性。为了揭示并改良层间错动带的力学特性, 首先通过矿物成分分析试验、扫描电镜试验和压汞试验, 从微观结构角度对层间错动带的矿物组成特征、颗粒排列规律、孔隙分布规律进行了详细的研究, 阐明了层间错动带的微观结构特性及其对灌浆材料选择的影响, 进而开展了层间错动带化学溶液浸泡对比试验。试验表明, 硅酸钠溶液可以有效改善层间错动带的完整性, 明显提高层间错动带的弹性波速、抗压强度、弹性模量和凝聚力。其研究结果对白鹤滩层间错动带的工程加固和改性设计具有一定的借鉴意义。

关 键 词: 层间错动带; 微结构特性; 化学改性

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

Preliminary study of microstructural properties and chemical modifications of interlayer shear weakness zone in Baihetan

SHI Cun-peng, FENG Xia-ting, JIANG Quan, XU Ding-ping

(State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

Abstract: Interlayer shear weakness zone has a series of features such as loose structure, easy to be softening, large spatial distribution and poor mechanical properties in Baihetan hydropower station. The existence of interlayer shear weakness zone seriously affects the stability of underground cavern groups of hydropower station. In order to reveal and improve the mechanical properties of interlayer shear weakness zone, X-ray diffractometer, scanning electron microscope and mercury intrusion porosimetry tests are applied separately to observe and determine the main mineral composition, the orientated range of particles and the distribution of pore structure in samples. Microstructural properties of interlayer shear weakness zone and its effect on the selection of grouting materials are discussed in detail combining with the testing data. What's more, chemical modification experiments are carried out based on above experiments. Comparative experiment between samples immersed with or without sodium silicate solution indicates that chemical modification can improve the integrality, elastic wave velocity, compressive strength, elastic modulus and cohesion of interlayer shear weakness zone effectively. These cognitions can provide some useful means for the engineering reinforcement and modification design of interlayer shear weakness zones in Baihetan hydropower station.

Key words: interlayer shear weakness zone; microstructural properties; chemical modification

1 引 言

层间错动带是指软硬相间的岩层在构造作用下发生层间剪切错动, 并在地下水长期物理化学作用下形成的一种组构特异、性状很差的薄层带状岩土体系统^[1-3]。它的存在往往对地下工程的稳定起着

控制性作用^[4], 易诱发地下洞室出现边墙开裂、上下层岩体错位、顶拱塌落等工程问题。层间错动带的微观结构是指具有一定粒度成分和矿物成分的层间错动带微小单元体的组构特征、空间分布特征以及微观孔隙分布规律等。它一方面反映了层间错动带的形成条件, 另一方面又是决定层间错动带工程

收稿日期: 2012-02-28

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(No. 2010CB732006); 国家自然科学基金项目(No. 41172284)。

第一作者简介: 史存鹏, 男, 1982 年生, 博士, 主要从事岩石力学性质与地下工程稳定性方面的研究工作。E-mail: shicp@163.com

性质的重要因素^[5-7]。在有层间错动带出露的地下工程建设中,深入了解层间错动带的微观结构,可为认识洞室开挖过程中层间错动带的不利力学响应及其加固和改性设计提供基础数据。

白鹤滩水电站位于金沙江下游四川省宁南县和云南省巧家县境内,电站总装机容量为 12 600 MW,是我国继三峡、溪洛渡之后的又一座千万千瓦级水电站。通过工程区的地质调研发现,白鹤滩水电站普遍发育有其他工程所罕见的力学性质较差的层间错动带,见图 1。发育于左右岸厂址区的 C2~C5 层间错动带普遍具有结构疏松、性状软弱、分布随机、延展性强、错动变形性强、遇水易软化等一系列特征^[8-9],是影响地下厂房洞室群围岩稳定的最主要的地质构造。这些层间错动带的存在大大破坏了岩体的完整度,地下洞室围岩极有可能出现诸如边墙开裂(如图 2(a)所示)、错动、大变形、拱顶局部掉块或垮塌(如图 2(b)所示)等一系列工程问题。



图 1 层间错动带在白鹤滩水电站水平探洞中的出露示例
Fig.1 An example of interlayer shear weakness zone from an exploratory tunnel of Baihetan hydropower station



(a) 边墙开裂

(b) 拱顶掉块

图 2 层间错动带引起的白鹤滩水电站水平探洞破坏形式
Fig.2 Failure modes caused by interlayer shear weakness zone in exploratory tunnel of Baihetan hydropower station

鉴于此,本文以出露于白鹤滩水电站右岸厂址区的 C4 层间错动带为研究对象,通过矿物成分分析试验、扫描电镜试验和压汞试验,详细阐述了层间错动带的微观结构特性及其对灌浆改性材料选择的影响,进而开展了层间错动带硅酸钠溶液浸泡改性对比试验。试验表明,硅酸钠溶液可以有效地改善层间错动带的力学性质。研究结果对白鹤滩层间错

动带的工程加固和改性设计具有一定的借鉴意义。

2 层间错动带微结构特性试验研究

2.1 矿物组成特征

层间错动带通常含有大量的黏土矿物,而黏土矿物成分及其含量的不同往往会造成层间错动带水理性质、物理力学性质等产生很大的差异,从而影响其工程特性^[10]。因此,对层间错动带进行矿物成分分析非常必要。本文采用 X 射线衍射仪对随机取样的 5 组白鹤滩 C4 层间错动带样进行了矿物成分鉴定,分析结果见表 1。

表 1 C4 层间错动带矿物成分分析
Table 1 Mineral composition analysis of interlayer shear weakness zone C4

编号	矿物分量/%			黏土矿物分量/%			
	赤铁矿	褐石	黏土矿物总量	蒙脱石	伊蒙混层	伊利石	绿泥石
1	12	44	44	0	65	25	10
2	18	39	43	0	70	25	5
3	13	34	53	15	55	20	10
4	16	19	65	20	50	20	10
5	17	32	51	5	65	25	5

由表可知,黏土矿物总含量约占层间错动带矿物组成的 50%左右,且普遍以伊蒙混层、伊利石、绿泥石的形式存在;在 3[#]~5[#]层间错动带样中还以蒙脱石的形式存在。黏土矿物成分不同,其膨胀性能也不同,这是由黏土矿物的晶体结构所决定的。蒙脱石是 3 层结构,是由两层硅氧四面体中间夹着一层铝氧八面体组成的二八面体型构造,晶胞之间以氧层相连接,具有极弱的键和良好的解理,使极性水分子容易进入单位晶层中间,形成水膜夹层,产生晶格扩张膨胀。伊利石的晶体构造与蒙脱石相似,同样由两层硅氧四面体和一层铝氧八面体组成。所不同之处是在两个晶胞之间因吸附钾离子而使联接力增强,晶格架的活动能力较蒙脱石低,使一部分极性水分子可以进入晶层中间,显示弱的遇水膨胀性。伊蒙混层是指黏土矿物中伊利石及蒙脱石混合成层的一种存在形式,其水敏感性强于纯的伊利石,弱于蒙脱石。绿泥石为 2:1 层状硅酸盐矿物,其矿物结构中具有两个基本单元:一个为硅氧四面体,另一个为铝氧八面体或镁氧八面体,水敏感性明显低于蒙脱石。

蒙脱石具有极强的水敏感性,吸水后体积可膨大数倍,脱水后则可收缩,当其含量占矿物总含量的 5%以上时,土体就可以表现出明显的膨胀性^[11]。伊蒙混层水敏感性强于纯的伊利石,弱于蒙脱石。

伊利石和绿泥石性质类似，水敏感性明显低于蒙脱石。在 3[#]和 4[#]层间错动带样中，蒙脱石占层间错动带矿物总含量的百分比分别为 $53\% \times 15\% = 7.95\%$ 和 $65\% \times 20\% = 13\%$ ，已超出 5% 这个指标，故蒙脱石的含量是影响层间错动带水稳定性的最主要因素。层间错动带的化学改性试验应重视其遇水膨胀性。

2.2 微观结构

扫描电子显微镜（简称 SEM）可用于岩土体微观结构研究^[12]，通过扫描电镜试验，可以观测层间错动带的颗粒排列规律、孔隙分布规律等一系列微观结构特征，从而解释层间错动带的成因及其发生宏观变形的微观机制。扫描电镜试验的取样方法如图 3 所示。垂直于层间错动带延展方向随机取两个试样并编号为 A1、A2；沿层间错动带延展方向随机取两个试样并编号为 B1、B2。试验时，视线平行于取样方向进行观测。层间错动带样的微观结构如图 4 所示。

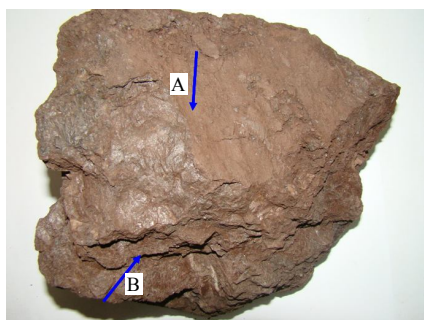


图 3 层间错动带扫描电镜试验取样方向示例
Fig.3 Sampling direction of interlayer shear weakness zone for scanning electron microscope

从图 4(a)~4(d)可以看出，层间错动带的微小颗粒在平行层面和垂直层面两个方向上的微观结构有着明显的差异。平行层面延展方向表现为明显的鳞片状定向有序排列结构特征，垂直于层面延展方向表现为明显的层状排列结构特征。此外，对照 SEM 微观结构图中的比例尺可知，层间错动带微孔隙非常小，基本上都远小于 $10\ \mu\text{m}$ 。

以上微结构特征是由层间错动带的赋存环境所决定的。如图 5(a)所示，层间错动带发育于软硬相间的缓倾角岩层间，其微颗粒在长期的高法向应力 σ 及高构造剪应力 τ 作用下被压实并剪切拉伸，从而形成了上述的定向有序成层排列的微观结构特征。

由层间错动带定向有序成层排列的结构特征及构造剪应力的分布特征（见图 5(b)）可知：在外力扰动下，微颗粒层间的胶结力易受到破坏，从而导致剪应力在层间错动带的局部失去平衡，故在外力

扰动下，层间错动带有沿错动带延展方向错动活化的趋势。

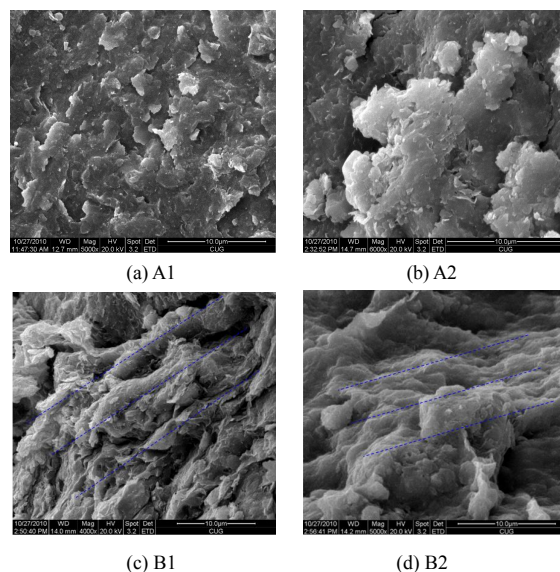


图 4 C4 层间错动带 SEM 微观结构图
Fig.4 SEM microstructure of interlayer shear weakness zone C4

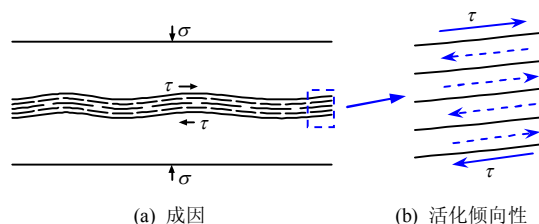


图 5 层间错动的成因及错动活化倾向性示意图
Fig.5 Genesis and activation tendency sketch of interlayer shear weakness zone

2.3 孔隙分布规律

压汞法（简称 MIP）是研究岩土体微观结构非常有效的方法之一，使用压汞法可以定量研究岩土体内微孔隙的分布规律^[13]。试验时，对随机取样的 3 个 C4 层间错动带样干燥后进行测试，测得层间错动带的累积孔隙分布曲线如图 6 所示。

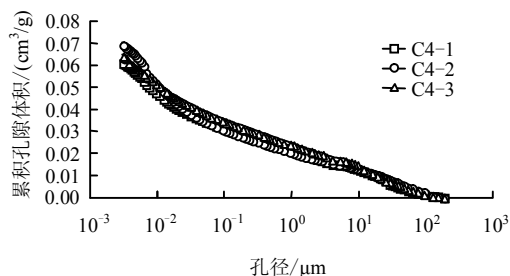


图 6 C4 层间错动带累积孔隙分布曲线
Fig.6 Cumulative pore size distribution curves of interlayer shear weakness zone C4

累积孔隙体积分布曲线类似颗粒级配曲线, 描述了大于某孔径的所有孔隙体积累加量与孔径之间的关系。由于大孔隙与小孔隙的直径大小相差 5 个数量级, 为便于分析试验结果, 孔隙直径采用对数刻度表示。不同孔径范围内的孔隙体积占总孔隙体积的比例多少, 在孔隙累积分布曲线上表现为该孔径范围内曲线斜率的大小。斜率越大, 表明所占的孔隙比例越多; 斜率越小, 则表明所占的孔隙比例越少。对累积孔隙分布曲线进行微分运算, 得到孔径分布密度曲线 $dV/d(\lg d)-d$, 如图 7 所示, 图中的峰值大小代表该孔径对应的孔隙体积多少。

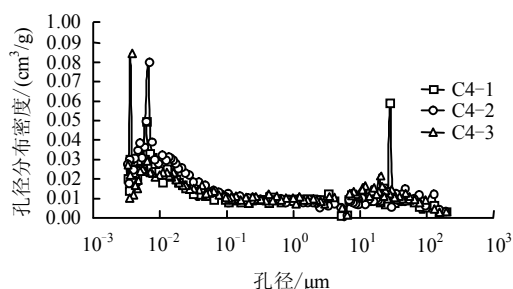


图 7 C4 层间错动带孔径分布密度曲线

Fig.7 Density distribution curves of pore size of interlayer shear weakness zone C4

从图 6 可以看出, 单位质量的层间错动带累计孔隙体积非常小, 约为 $0.065 \text{ cm}^3/\text{g}$, 这与其赋存环境的地应力较高有关。从图 7 可以看出, 层间错动带的孔径可以分为 $0.003 \sim 6 \mu\text{m}$ 和 $6 \sim 200 \mu\text{m}$ 两个区间。以 $6 \mu\text{m}$ 孔径为参考点并对照图 6 可知, 分布在 $0.003 \sim 6 \mu\text{m}$ 区间内的微小孔隙约占孔隙总量的 $3/4$ 以上, 这与图 4 中看到的层间错动带孔径基本上都远小于 $10 \mu\text{m}$ 较一致。

故层间错动带的孔隙率较小, 且大部分孔隙的孔径小于 $6 \mu\text{m}$ 。在对其灌浆改性时应选择粒径较小的灌浆材料。

3 层间错动带化学改性试验研究

类似层间错动带这样的软弱岩土体, 一直是岩体力学研究的重要课题, 而且习惯上都是采用土工试验的方法对其工程性质进行研究。层间错动带不同于土的地方在于它有复杂的应力历史, 尤其是剪切错动史, 层间错动带所处的应力状态明显受两侧岩层的控制。在对其进行研究时, 研究方法上需要以土工试验为基础, 同时借鉴岩体力学的原则^[14]。由于层间错动带天然产出厚度很小, 原状样取样困难, 利用重塑样研究其力学性质具有较大的优越性。

本文以 C4 层间错动带重塑样为研究对象, 开展硅酸钠溶液浸泡改性试验。

3.1 层间错动带重塑样制备

将层间错动带扰动样在自然状态下风干破碎, 筛取粒径小于等于 5 mm 的颗粒, 按照实测的层间错动带含水率以及干密度, 用直径 $\phi=50 \text{ mm}$ 、高度为 100 mm 的钢模具重塑^[15]。试验时, 根据《水利水电工程岩石试验规程》^[16]要求, 将制好的错动带重塑样在 $(40 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C})$ 的烘箱内烘至恒重备用。

3.2 化学溶液浸泡改性试验

水泥基浆材是目前灌浆工程中应用最广泛的灌浆材料。由于水泥的颗粒性, 注入能力有限。一般情况下, 普通水泥只能灌注岩土的大孔隙或裂隙 $0.20 \sim 0.3 \text{ mm}$, 超细水泥掺入适当的分散剂后, 可注入 $0.05 \sim 0.09 \text{ mm}$ 的岩石裂隙^[17]。然而层间错动带孔隙的孔径主要集中在小于等于 $6 \mu\text{m}$ 的范围内, 采用水泥基浆材灌浆较困难, 现考虑采用硅酸钠溶液开展层间错动带化学改性室内试验研究。

鉴于层间错动带孔隙较小、遇水易软化、易膨胀等性质, 试验时采用自行研制的层间错动带化学改性浸泡固定保护装置, 如图 8 所示。

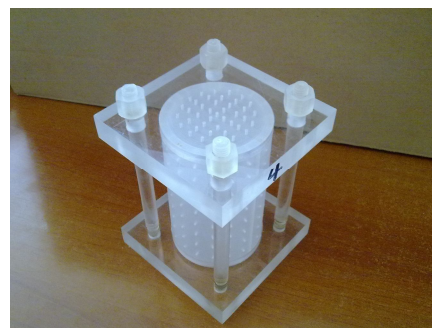


图 8 层间错动带固定保护装置

Fig.8 Protection device for interlayer shear weakness zone

将备用的层间错动带重塑样, 用滤纸包裹后装入固定保护装置。12 个分为一组, 共两组。按组分别浸入水和质量浓度为 3% 的硅酸钠溶液中, 每天称重两次至恒重。将浸泡至恒重的层间错动带重塑样在 $((40 \pm 5)^\circ\text{C})$ 的烘箱内烘至恒重^[16]。将用水和用 3% 质量浓度的硅酸钠溶液浸泡至恒重的层间错动带重塑样, 分别记为改性前的层间错动带样和改性后的层间错动带样。

3.3 改性效果分析

3.3.1 对层间错动带完整性的影响

如图 9 所示, 对比用水和 3% 质量浓度的硅酸钠溶液浸泡至恒重的层间错动带重塑样, 可以看出,

硅酸钠溶液可以有效防止层间错动带微小黏土颗粒的析出,较好地提高了层间错动带的完整性。



图9 用水和硅酸钠溶液浸泡后的重塑样

Fig.9 Comparison between remolded samples immersed with water and sodium silicate solution

3.3.2 对层间错动带力学指标的影响

根据《土工试验方法标准》^[15]和《水利水电工程岩石试验规程》^[16],开展弹性波测试试验和常规三轴试验。由于层间错动带所处的应力状态明显受两侧岩层的控制,其强度对围压十分敏感,故基于三轴抗压强度内推得其单轴抗压强度。改性前后的层间错动带样单轴抗压强度内推过程如图10所示。

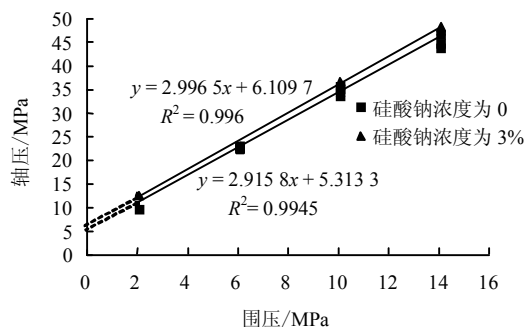


图10 重塑样三轴压缩试验 Mohr-Coulomb 强度拟合曲线

Fig.10 Mohr-Coulomb fitting curves of remolded samples in triaxial compression test

从图中可知,层间错动带改性前的抗压强度为 5.31 MPa,改性后的抗压强度为 6.11 MPa。由拟合公式及 Mohr-Coulomb 准则计算得到层间错动带改性前的凝聚力为 1.36 MPa,改性后的凝聚力为 1.77 MPa。

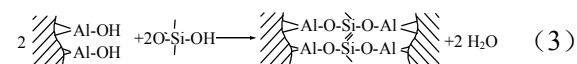
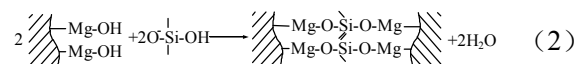
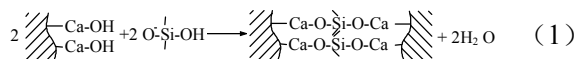
改性前后层间错动带的力学指标如表2所示。由表可知,用硅酸钠溶液改性后,层间错动带重塑样的纵波波速平均值增加了 21.33%,单轴抗压强度增加了 15.07%,弹性模量平均值增加了 74.63%,凝聚力增加了 30.15%。

表2 用水和硅酸钠溶液浸泡后的重塑样力学指标对比

Table 2 Comparison between mechanical parameters of samples immersed with water and sodium silicate solution

硅酸钠浓度 /%	纵波波速平均值 /(m/s)	单轴抗压强度 /MPa	弹性模量平 均值/MPa	凝聚力 /MPa
0	633	5.31	3.35	1.36
3	768	6.11	5.85	1.77

由以上分析可知,硅酸钠溶液可以有效提高层间错动带的完整性、弹性波速、单轴抗压强度、弹性模量和凝聚力等性质。这是因为,硅酸钠可以与黏土矿物中的高价金属离子反应生成硅酸钙、硅酸镁、硅酸铝沉淀和硅胶颗粒^[18],其主要化学反应式为



这些新生硅质胶结物可以填塞层间错动带的微孔隙,并可以提高层间错动带微颗粒间的胶结力。

4 结 论

(1) 层间错动带中的黏土矿物总含量约占其矿物组成的 50%左右,且普遍以伊蒙混层、伊利石、绿泥石的形式存在,部分还以遇水膨胀性很强的蒙脱石的形式存在,这决定了层间错动带具有一定的遇水膨胀性。

(2) 层间错动带定向有序成层排列的微结构特征决定了其在外力扰动下有沿层间错动带延展方向错动活化的趋势。在白鹤滩水电站地下洞室开挖过程中,如不及时对层间错动带采取灌浆改性等加固措施,随着开挖扰动的进行以及开挖后临空面的出现,易诱发层间错动带重新错动活化,从而导致工程问题。

(3) 层间错动带孔隙率很小,3/4 以上的孔隙孔径都远小于 6 μm。在对其进行灌浆改性时应选择粒径较小的灌浆材料。

(4) 对比改性前后层间错动带的力学特性发现,改性后的层间错动带样在完整性、弹性波速、抗压强度、弹性模量和凝聚力等方面均较改性前有明显的提高。表明水玻璃基化学溶液可用于层间错动带的改性加固,其用于现场加固的效果以及工艺参数尚有待进一步研究。

参考文献

- [1] 肖裕行, 肖树芳, 徐瑞春, 等. 层间剪切带法向空间分布定量预报[J]. 工程地质学报, 1996, 4(1): 20—26.
XIAO Yu-xing, XIAO Shu-fang, XU Rui-chun, et al. The quantitative prediction of the location of interbed shear zones in perpendicular direction[J]. **Journal of Engineering Geology**, 1996, 4(1): 20—26.
- [2] 贾志远. 层间剪切带工程地质专家系统[J]. 水文地质工程地质, 1994, (3): 29—34.
JIA Zhi-yuan. Expert system for interlayer shear zone[J]. **Hydrogeology & Engineering Geology**, 1994, (3): 29—34.
- [3] 王世梅. 层间剪切带工程地质专家系统知识模型的建立[J]. 工程地质学报, 1996, 4(2): 44—50.
WANG Shi-mei. Construction of knowledge model of expert system for interlayer shear zone[J]. **Journal of Engineering Geology**, 1996, 4(2): 44—50.
- [4] 彭汉兴, 吕民康, 王建平. 软弱夹层泥化过程中的水文地球化学作用[J]. 河海大学学报(自然科学版), 1991, 19(1): 73—78.
PENG Han-xing, LÜ Min-kang, WANG Jian-ping. Hydrogeochemical action in the process of sandwich argillization[J]. **Journal of Hohai University (Natural Sciences)**, 1991, 19(1): 73—78.
- [5] 王先锋, 刘万, 仵磊. 泥化夹层的组构类型与微观结构[J]. 长春地质学院学报, 1983, (4): 73—82.
WANG Xian-feng, LIU Wan, NAI Lei. Fabric types and microstructure of clay partings[J]. **Journal of Changchun College of Geology**, 1983, (4): 73—82.
- [6] 王幼麟, 肖振舜. 软弱夹层泥化错动带的结构和特性[J]. 岩石力学与工程学报, 1982, 1(1): 37—44.
WANG You-lin, XIAO Zhen-shun. The microstructure and the behaviour of the muddled shear zone in weak intercalation[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 1982, 1(1): 37—44.
- [7] 项伟. 软弱夹层微结构研究及其力学意义[J]. 地球科学——武汉地质学院学报, 1985, 10(1): 165—169.
XIANG Wei. The study of microstructures of weak intercalations and their mechanical significance[J]. **Earth Science—Journal of Wuhan College of Geology**, 1985, 10(1): 165—169.
- [8] 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.
- [9] 唐鸣发. 金沙江白鹤滩水电站可行性研究阶段坝线选择工程地质勘察报告[R]. 杭州: 中国水电顾问集团华东勘测设计研究院, 2008.
- [10] 陶振宇, 潘别桐. 岩石力学原理与方法[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1991.
- [11] 钱家欢, 殷宗泽. 土工原理与计算[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1996.
- [12] 张汝藩, 杨主恩. 扫描电镜与微观地质研究[M]. 北京: 学苑出版社, 1999.
- [13] HICHER P Y, WAHYUDI H, TESSIER D. Microstructural analysis of inherent and induced anisotropy in clay[J]. **Mechanics of Cohesive-frictional Materials**, 2000, 5(5): 341—371.
- [14] 张虎元. 断层泥重塑样的实验室制备[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 1988, 24(增刊 1): 145—147.
ZHANG Hu-yuan. Remolding fault gouge in laboratory[J]. **Journal of Lanzhou University (Natural Science Edition)**, 1988, 24(Supp.1): 145—147.
- [15] 中华人民共和国国家标准编写组. GB/T 50123—1999 土工试验方法标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 1999.
- [16] 中华人民共和国国家标准编写组. SL264—2001 水利水电工程岩石试验规程[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2001.
- [17] 孙纪正. 常用灌浆材料性能试验研究[硕士学位论文 D]. 济南: 山东大学, 2005.
- [18] 地基处理手册编写委员会. 地基处理手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000.