

文章编号: 1006-4362(2020)01-0104-09

软弱夹层工程地质特征研究进展

张家明

(昆明理工大学建筑工程学院,昆明 650500)

摘要: 软弱夹层是控制岩体稳定性的重要薄层,研究软弱夹层的工程地质特征具有重要的科学意义和实际工程意义。在收集整理国内外相关资料的基础上,首先从定义和分类、形成机制和影响因素、分布特征和规律、工程地质特性和力学特性5个方面对国内软弱夹层和泥化夹层的研究进行总结和概述,然后分析当前研究存在的不足之处,讨论软弱夹层与泥化夹层的区别与联系。研究表明,与原生软弱夹层相比,泥化夹层更薄,工程地质性质更差。最后提出下一步重点研究方向:软弱夹层的泥化演化过程及泥化夹层的演化趋势;软弱夹层的三维空间分布及可视化;软弱夹层的剪切蠕变理论模型,细观损伤破坏动态演变规律,应力松弛特性和动力学特性;软弱夹层与围岩间的接触面及组合岩体的力学特性。

关键词: 软弱夹层;泥化夹层;工程地质特征;力学特性;进展

中图分类号: P642. 2;TU452;TU457 **文献标识码:** A

ADVANCES IN THE ENGINEERING GEOLOGICAL PROPERTIES OF WEAK INTERCALATION

ZHANG Jia-ming

(Faculty of Civil Engineering and Mechanics, Kunming University of Science and Technology,
Kunming 650500, China)

Abstract: Weak intercalation is important thin layer and plays an important role in controlling the stability of rock mass. Concerning weak intercalation study have gotten plentiful accomplishment. However, the knowledge of people still has a lot of blank spots, the problem needs that still have a lot of aspects are going deep into a discuss. Furthmore, engineering geology problems induced by weak intercalation are still common. Therefore, it is of important engineering significance and scientific significance for carry out the study of weak intercalation. Based on the collection and review of the domestic and foreign literatures related to the weak intercalation, firstly, the paper reviewed the definition and classification, formation mechanism and influencing factor, spatial distribution, engineering geological characteristics and mechanical properties of weak intercalation. Secondly, the existing problems in the studies of the engineering geological properties of weak intercalation were analyzed and the differences and relationship between weak intercalation and siltized intercalation were discussed. Results show that the thickness of siltized intercalation is thinner and the engineering geological properties of siltized intercalation are weaker as compared to primary weak intercalation. Finally, on the basis, this paper also puts forward the key directions of the studies about the issues. They include the argilization process of weak intercalation and the

收稿日期: 2019-09-27 **改回日期:** 2019-11-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(41807258);云南省应用基础研究计划项目(2014FD007);云南省人才培养项目(KKSYS201406009);云南省教育厅科学研究基金项目(2018JS024);中国有色金属工业昆明勘察设计研究院有限公司科技创新项目(2019YN05)

evolution trend of siltized intercalation, the three-dimensional spatial distribution and visualization of the weak intercalation, the shear creep model, meso-damage and failure process, stress relaxation and dynamic properties of weak intercalation, the mechanical properties of combined weak intercalation and surrounding rock and interface between weak intercalation and surrounding rock.

Key words: weak intercalation; siltized intercalation; engineering geology; mechanical property; advance

1 引言

软弱夹层的工程地质性质比上、下围岩差,是控制岩体稳定性的重要薄层,常引发各种工程地质问题。据 20 世纪 70 年代的不完全统计,我国约三分之二的大坝坝基都涉及到软弱夹层的抗滑稳定问题^[1]。正在建设的白鹤滩水电站的地下洞室稳定性也受到软弱夹层的威胁^[2]。三峡库区约 90% 以上的崩塌、滑坡都发生在含有软弱夹层的层状岩质斜坡中,而且滑带多为软弱夹层^[3]。在雨季,泥化夹层的强度降低,宜昌-巴东高速公路的路堑边坡产生了大量顺层滑坡^[4]。四川盆地大量侏罗系红层滑坡主要是由软弱夹层遇水软弱引起的^[5]。贵州省第二大地质灾害是由软弱夹层塑性流变引起的软弱基座型崩塌灾害^[6]。

软弱夹层相对较薄,常规调查方法难以查明其分布情况和性质,甚至会忽略软弱夹层的存在,给工程建设造成了许多危害。比如,软弱夹层曾导致美国宾州 Austin 坝、法国 Malpasset 坝等坝基破坏,意大利 Vajont 水库岸坡滑坡^[7,8]。泥化夹层也曾小浪底水电站坝址引发了边坡、洞室围岩和坝基滑动,甚至失稳^[9]。2018 年 5 月,云南玉溪研和垃圾焚烧发电厂高边坡的支挡结构全部失稳,主要原因是前期没有查明泥化夹层的工程地质特性。

20 世纪 50 年代后期,国内工程地质界开始对软弱夹层进行研究^[10]。70 年代以来,随着葛洲坝等大型水利水电枢纽的开工建设,软弱夹层得到了充分研究,并取得了丰硕成果。为进一步开展相关研究提供基础和参考,本文首先综述了软弱夹层和泥化夹层在定义和分类,形成机制和影响因素,分布特征和规律,工程地质特性和力学特性等方面的研究概况,讨论了软弱夹层与泥化夹层的区别与联系,然后分析了当前研究存在的不足之处,最后对该领域今后的研究方向提出了建议。

2 软弱夹层的研究概述

2.1 软弱夹层的定义和分类

根据软弱夹层与泥化夹层的范畴关系,前者的

定义可分为狭义的和广义的,狭义的软弱夹层不包括泥化夹层,而广义的则包括。例如,《地质大辞典》^[11]给出狭义的定义,即软弱夹层是指在未经风化或构造破坏的条件下,坚硬岩石中夹有的相对较软的岩层。夹层的结构较松散,力学强度低或遇水软化或泥化,一般比坚硬岩层薄得多,容易风化破碎,受构造活动破坏和地下水的作

用。在广义方面,《岩土工程基本术语标准》^[12]这样定义软弱夹层,即岩体中强度较低或被泥化、软化的具有明显上下界面的破碎层、缝、带等。王桂容^[13]认为,软弱夹层泛指颗粒细、层薄、间夹在相对坚硬的岩层中的夹层,呈层状或条带状,力学强度低,遇水易软化或泥化。谭超等^[14]给出的定义稍微宽泛一些,即软弱夹层一般指岩体中比上、下岩层显著较为软弱,而且单层厚度也比较薄的岩层。他们都认为泥化夹层是已经泥化了的软弱夹层。

在软弱夹层的分类方面,根据工程地质特征将其分为新鲜板岩及砂质板岩夹层、破碎夹泥层、泥化板岩夹层^[15];按三大岩类,分为岩浆岩型、沉积岩型、变质岩型;按夹层的倾角分类:水平、缓倾、中陡、陡倾;按颗粒组成和破碎程度分类:泥化夹层、破碎夹层、片状夹层;按成因分类:原生型、次生型、构造型及综合型^[13]。其中,按成因、颗粒组成和破碎程度分是使用最广泛的分类方法。

2.2 分布特征和规律

软弱夹层的分布特征和规律研究主要集中于软弱夹层的厚度和层数^[16-17]。万州地区侏罗系红层中有两类软弱夹层,其中蒙脱石泥岩的厚度 3~80 cm,薄的数毫米,厚度大的有 8 层,而紫红色泥岩的厚度一般 1~10 cm,层数较多^[16]。重庆武陵鸡尾山滑坡区软弱夹层的平均厚度超过 0.3 m,延伸长度超过 50 m 的有 7 层,夹层垂直距离在 25~35 m 之间,具有等距分布的特点^[9]。

2.3 工程地质特性

软弱夹层的工程地质特性研究涉及到其岩性、沉积环境、结构、构造、物理、水理和化学性质。例如,徐开祥等^[18]介绍了链子崖危岩体软弱夹层的岩性,为碳质页岩。邬金华等^[19]研究了高坝洲水电站

坝基软弱夹层的沉积环境、矿物成分及其来源。项伟^[20]采用偏光显微镜和电子显微镜分别研究了软弱夹层的显微结构和超微结构。肖拥军等^[17]介绍了巴东新城白土坡三叠系巴东组软弱夹层的结构和矿物成分,矿物以绿泥石、伊利石、石英和方解石为主。朱赛楠等^[3]探讨了软弱夹层不同演化阶段(原生软弱夹层→层间剪切带→滑带)的结构、矿物组分、物理和化学性质的变化规律。结果表明,随着软弱夹层的演化,孔隙及裂隙增多,孔隙率增大,密度降低,结构变得疏松,黏土矿物含量增加,交换性盐基减少,有机质含量增加,抗剪强度降低。简文星等^[16]分析了万州侏罗系红层中软弱夹层的矿物成分、结构、构造和物理性质:矿物主要有蒙脱石、长石、石英、伊利石和绿泥石,微结构以片状结构为主,具有中等膨胀性和遇水软化性。软弱夹层的物理、水理和化学性质的研究包括天然含水率、密度、孔隙率、液限、塑限、塑性指数、颗粒组成、自由膨胀率、渗透系数和化学成分^[16,21]。

2.4 力学特性

软弱夹层的力学研究主要集中于剪切特性、流变特性和破坏形式。

在剪切特性方面,葛修润^[1,22]分析了软弱夹层的剪切变形、剪切强度、剪切膨胀和剪切刚度等,然后提出了软弱夹层的非线性分析计算模型。郭志^[23]的研究表明,软弱夹层厚度增大,摩擦系数呈非线性降低。符文熹等^[24]提出了摩擦系数 f 与压应力 $P/100$ kPa 的关系式: $f = 0.185 + 0.176 \ln(P)$, ($r^2 = 0.992$)。王义军等^[25]通过试验研究了贵州新街子滑坡软弱夹层的比例极限强度、屈服极限强度和峰值极限强度。针对四川某潜在石灰岩滑坡的软弱夹层, Ma 等^[26]的环剪试验结果表明,软弱夹层的峰值强度、残余强度与含水率、法向应力密切相关,含水率对抗剪强度有显著影响。简文星等^[16]试验结果表明,红层中软弱夹层饱水后抗剪强度降低了 40%~55%。许宝田等^[27]试验研究了软弱夹层剪切变形的阶段性和强度特征,并采用双曲线模型讨论了法向应力-压缩位移的关系。他们^[28]还检验了剪切变形本构模型中双曲线模型和指数模型的适用性,提出了更接近实际的幂函数模型。陈宾等^[29]采用快剪试验、SEM 和 PCAS 图像处理软件,研究了干湿循环条件下软弱夹层的剪切强度、黏聚力及内摩擦角与微结构参数的关系。结果表明干湿循环造成岩土微结构破坏是软弱夹层抗剪性能劣化的主要原因。

在流变特性方面,张奇华等^[30]给出了软弱夹层

的长期抗剪强度参数: $c_{\infty} = 12 \sim 35$ kPa, $\varphi_{\infty} = 21^{\circ} \sim 25^{\circ}$, 并用 Burgers 模型和 Kelvin-Voigt 模型描述了蠕变曲线。王祥秋等^[31]研究了软弱夹层的非线性流变特性,构建了非线性遗传蠕变方程,确定了其长期强度: $c_{\infty} = 4.053$ kPa, $\varphi_{\infty} = 16.34^{\circ}$ 。王志俭等^[32]对软弱夹层进行过排水蠕变试验,并用 Singh-Mitchell 模型描述了蠕变特性。程强等^[33]分析了软弱夹层的剪切蠕变特性和长期强度,并建议长期剪切强度可取短期剪切强度的 75%。王宇等^[34]探讨了软弱夹层蠕变阶段性规律:平均及稳态剪切蠕变速率与剪应力呈指数关系。Ma 等^[35]采用环剪蠕变试验研究了含水率对软弱夹层蠕变特性的影响,并提出新的剪切蠕变模型。研究表明含水率对软弱夹层的长期强度有显著影响,随含水率的增大而降低。朱赛楠等^[3]报道了不同演化阶段软弱夹层的长期抗剪强度参数:原生软弱夹层→层间剪切带→滑带, $c_{\infty}: 585$ kPa→318 kPa→96 kPa, $\varphi_{\infty}: 57.6^{\circ} \rightarrow 42.0^{\circ} \rightarrow 29.6^{\circ}$ 。

在破坏形式方面,王宇等^[34]认为软弱夹层的剪切蠕变属于延性破坏。宋彦琦等^[36]研究了不同倾角的软弱夹层对大理岩破坏的影响:单轴压缩时,夹层岩石是劈理破坏,但在倾斜夹层处产生拉剪复合破坏;三轴压缩时,属于剪切破坏。Zuo 等^[37]分析了含软弱煤夹层“岩-煤-岩”组合岩体的变形和破坏行为:围压从低升到中、高,组合岩体的破坏机理从混合裂纹损伤、平行裂纹损伤到单剪切裂纹损伤或整体混合截面损伤(integral mixed section damage);软弱煤夹层改变了“岩-煤-岩”组合岩体的破坏机制和强度。

3 泥化夹层的研究概述

3.1 泥化夹层的定义和分类

泥化夹层是指受风化或构造破坏,原状结构发生显著变异,并在地下水长期作用下,形成的含水率在塑限和流限之间的泥质软弱夹层^[11]。王先锋等^[38]认为,泥化夹层是指岩体中软弱夹层在层间错动与地下水的长期物理化学作用下所形成的结构疏松,颗粒大小不均,多呈定向排列,粒间连结微弱,强度较低的特殊软弱层。王东华^[39]认为软弱夹层经过顺层的构造错动和地下水长期作用而泥化,发育成具有夹泥的层间错动带即是泥化夹层。

在泥化夹层分类方面,根据粒度成分,王先锋等^[38]将其分为黏泥型、泥夹碎屑型、碎屑夹泥-碎屑型、泥夹粉砂或粉砂夹泥型;徐国刚^[40]和刘庆军等^[41]都将其分为全泥型、泥夹碎屑型和碎屑夹泥

型,但在具体划分方案上略有差别;刘会源^[42]将其分为全泥型、泥夹角砾和粉砂夹泥。马国彦等^[43]给出的分类:全泥型、泥夹碎屑型、泥夹粉砂和粉砂夹泥、泥模型、角砾夹泥型。由此可见,泥化夹层主要基于粒度成分对其进行分类。

3.2 形成机制和影响因素

葛洲坝坝址区泥化夹层的形成过程,首先是沉积形成原生黏土岩夹层,然后在水平构造应力作用下发生层间错动,破坏黏土岩结构,最后在地下水长期物理化学作用下,黏土岩的状态、物理化学性质、物质成分发生变化形成泥化夹层^[7,44,45]。黄河小浪底水利枢纽区的泥化夹层主要是厚层坚硬砂岩层中所夹的页岩在构造作用下受层间剪切破坏,经风化和地下水长期浸泡而形成的构造夹泥^[46]。黄河中游地区的夹泥层主要是由层间错动形成的泥^[47]。李守定等^[48]讨论了三峡库区宝塔滑坡泥岩泥化过程的水化作用、离子交换作用和地下水对矿物的溶蚀作用。

宝珠寺水电站坝区有少数泥化夹层是经风化和次生物充填形成的短小夹泥层^[39]。乌江某坝址的泥化夹层层理清晰,原岩虽已成泥,但原始结构并未破坏,说明在泥化层的形成过程中,构造作用并非主要的,主要是水岩间一系列水文地球化学作用的产物^[49]。

攀枝花兰尖铁矿兰营采场边坡的细粒辉长岩与大理岩侵入接触的弱面,由于动力变质作用而形成挤压破碎带和断层泥,同时在动力变质热液的作用下,破碎带中的细粒辉长岩发生蚀变并与大理岩发生交代作用,最终形成了以黏土矿物为主的泥化夹层^[50]。

在泥化夹层形成的影响因素方面,既有研究表明,刚柔相间的组合岩层和富含黏土物质的软弱夹层是形成泥化夹层的物质基础,构造运动是形成泥化夹层的主导因素,地下水活动和风化作用是转变成泥的必要条件^[44,45]。葛洲坝坝区的砂岩即使受构造应力作用而破碎,甚至在层理面上产生一定的擦痕和磨光面,也没有发生泥化现象,这说明软岩泥化的前提是含有足够量的黏土矿物成分^[51]。此外,岩体卸荷致使岩体挤压应力的松弛较为明显,加快地下水入渗和岩石风化,促使夹层泥化^[39]。厚层软弱夹层或薄层砂岩与薄层软岩互层都不易形成泥化夹层^[9]。相比塑性岩体和弹塑性岩体,弹性岩体间的软弱夹层更容易泥化^[52]。

综上所述,泥化夹层的形成模式主要有3种:第一种是原生含泥质岩类夹层在构造作用和地下水的

长期作用下泥化形成的,是最为普遍的形成模式;第二种是软弱夹层在风化作用下形成的泥化夹层,构造作用并不是主要因素;第三种是在动力变质作用下形成的。泥化夹层的形成受岩性、矿物成分、岩层组合关系、构造运动和水文地质条件共同控制。

3.3 分布特征和规律

王东华^[39]分析了宝珠寺水电站坝址区泥化夹层的横向延伸稳定性。对黄河龙门水库坝区的调查总结如下^[42]:泥化夹层多产生于软弱岩层的顶面或底面上,少部分分布在软弱夹层的中间;泥化夹层的平面分布随所处构造部分而异;泥化夹层垂向分布在层间挤压破碎带上、下。一些学者^[9,52]讨论了断裂、褶皱、岩层组合和岩层倾角对小浪底水电站坝址泥化夹层分布的影响。

3.4 工程地质特性

泥化夹层的工程地质特性研究主要集中在物质组成、物理和水理特性、结构和构造特征方面。徐国刚^[40]分析了红色碎屑岩系中泥化夹层的粒度成分、黏土矿物和化学成分,构造分带,结构单元体的形状、大小、排列方式,孔隙特性,接触类型和结构连接,黏土矿物以伊利石为主。谭罗荣^[51]研究了葛洲坝水电站坝区泥化夹层的粒度成分和黏土矿物成分。在物理和水理特性方面,主要研究的指标有含水率、饱和度、土粒比重、容重、密度、饱和重度、孔隙比、比表面积、活动性指数、液限、塑限和塑性指数^[23,39]。Zhao等^[53]研究了孔隙比和粒度分布对次生泥化夹层保水性能的影响。钻孔压水试验表明玄武岩中层间错动带的渗透系数随埋深增加呈指数减小^[54]。祝艳波等^[4]测试了红层软岩泥化夹层的土水特征曲线。王先锋等^[38]曾将泥化夹层分为4种构造和7种显微结构。戴广秀等^[44]介绍了葛洲坝水电站坝基软弱夹层的构造分带:节理带、劈理带、泥化带。胡启军等^[55]采用SEM和图像处理技术研究了泥化夹层单元体的粒径、圆度、定向角和分形维数。史存鹏等^[56]运用XRD、SEM和MIP(压汞法)分析过白鹤滩电站玄武岩中的层间错动带:层间错动带含有大量黏土矿物,以伊蒙混层、伊利石和绿泥石为主,平行层面和垂直层面方向的微结构不同,孔隙率很小,约为 $0.065\text{ cm}^3/\text{g}$,大部分孔径小于 $6\text{ }\mu\text{m}$ 。

3.5 力学特性

泥化夹层的力学特性研究主要集中于剪切特性、流变性和动力特性3个方面。

在剪切特性方面,项伟^[57]认为泥化夹层的抗剪强度随黏粒含量增大而减小。刘庆军等^[41]构建了

泥化夹层的摩擦系数 f 与其物理指标的关系式:

$$f = 0.4329 + 0.00075h - 0.0055t - 0.0009x - 0.0122w$$

式中, h 为结构面起伏差/cm; t 为泥化夹层厚度/cm; x 为泥化夹层的黏粒含量/%; w 为泥化夹层的含水率/%。

张成恭等^[58]提出了泥化夹层摩擦系数与稠度状态指标之间的经验公式:

$$f = 0.27 - 1.5034 \log(W_s/W_p)$$

式中, W_s 为夹泥饱和含水率; W_p 为夹泥塑限含水率。

胡涛等^[59]建立了摩擦系数与 (W/W_p) 的关系:

$$f = a \times \ln(W/W_p) + b$$

式中, W 为天然状态下的含水率; a, b 为拟合系数。

这些公式表明泥化夹层的摩擦系数随结构面起伏差的增加而增加, 随泥化夹层的厚度、黏粒含量和含水率的增加而减小。Numelin 等^[60]的双剪切试验也证明了断层泥摩擦强度随黏土含量的增加而减小。Pellet 等^[61]运用直接剪切试验研究了饱和度对泥化夹层抗剪强度的影响: 当泥化夹层饱和时, 黏聚力和内摩擦角减小。陆有忠等^[62]采用支持向量机方法建立了泥化夹层的残余强度与物理指标的高度非线性映射关系。董遵德等^[63]取得了泥化夹层的有效应力抗剪强度: $c' = 25 \text{ kPa}$, $f' = 0.25$, 比固结快剪实验结果提高了 31.6%。闫汝华等^[64]给出了马家岩水库坝基泥化夹层的抗剪强度建议值: $c = 0 \text{ kPa}$, $f = 0.28$ 。Morrow 等^[65]试验表明黏土中结合水产生的假孔隙水压力降低了断层泥强度。针对白鹤滩水电站玄武岩中的层间错动带(泥化夹层), 冯夏庭教授团队^[66-71]开展了很多研究。江权等^[66]对泥化夹层和复合岩体(凝灰岩+泥化夹层+玄武岩)进行了环剪试验、直剪试验和三轴压缩试验, 讨论了试验方式、加载的法向应力大小、试样特点和含水率对错动带抗剪强度的影响, 最后确定原状和扰动状态下层间错动带的抗剪强度: 原状 $c = 300 \sim 400 \text{ kPa}$, $\varphi = 25^\circ \sim 30^\circ$; 扰动 $c \approx 90 \text{ kPa}$, $\varphi \approx 20^\circ$ 。徐鼎平等^[67]讨论了试样的不均匀性、扰动、试样尺寸、黏粒含量、初始饱和度对层间错动带抗剪强度的影响后认为, 黏粒含量(x)是影响抗剪强度的重要因素, 并给出相应关系式:

$$c = c_0 [1 - \exp(-\beta x)], \varphi = \varphi_0 \exp(-\alpha x)$$

式中: c_0 为黏土基质的黏聚力; φ_0 为黏粒含量为 0.0% 时的内摩擦角; α, β 均为比例系数, 由试验数据拟合而得。

Xu 等^[68]考虑了夹层厚度、夹层与围岩接触界

面几何形态的影响, 提出了一个直剪强度模型, 该模型能够描述夹层和界面的剪切行为, 还可以预测层间剪切软弱带的抗剪强度。赵阳等^[69]、段淑倩等^[70-71]进行过高围压三轴不排水剪切试验和不排水三轴常规加荷和卸荷试验, 研究了变形和破坏特征及变形模量、泊松比、抗剪强度。结果表明先期固结压力是影响错动带剪切特性的重要因素。郝小红等^[72]试验研究表明, 层间错动带的变形模量在 40~230 kPa 之间。大光包滑坡的层间错动带自上而下可分为破裂岩带、角砾岩带、糜棱质带和泥化带, 对底部 3 个带的试验研究表明, 泥化带的抗剪性能(抗剪强度指标、峰值强度和残余强度)弱于其他带, 且对水更加敏感, 碎裂化程度低的岩体其应变软化性更明显, 含水率高的岩体抗剪性能弱^[73]。

在流变性方面, 王幼麟等^[74]分析了葛洲坝水电站坝址泥化夹层的流变特性与其微结构的关系。肖树芳^[75]采用恒温饱水剪切蠕变试验研究了泥化夹层的蠕变规律, 并提出了蠕变模型(图 1)。杨天鸿等^[76]对阜新海州露天煤矿北帮边坡的泥化夹层进行了直剪流变试验, 讨论了法向应力与剪应力的关系, 并基于老化理论建立了流变力学模型, 提出了长期强度方程。陈兴周等^[77]开展过分级荷载作用下的剪切蠕变力学试验, 研究了错动带的长期强度和长期蠕变特性, 考虑了弹性参数随时间变化的损伤和随非线性加速蠕变变化引起的蠕变损伤, 提出一个黏弹塑性蠕变损伤本构模型(图 2)。

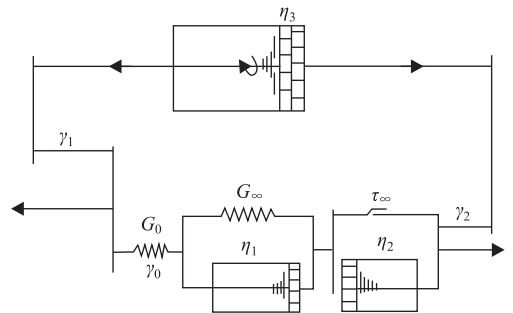


图 1 泥化夹层的概念蠕变模型^[75]

在动力特性方面, 薛守义等^[78]给出了泥化夹层动力总强度指标的建议值: $c_d = 5 \text{ kPa}$, $f_d = 0.29$ 。俞培基等^[79]研究了泥化夹层与围岩接触面的强度对泥化夹层动力抗剪强度和残余变形的影响。针对大光包滑坡的层间错动带, 朱凌等^[80]试验表明, 砂粒含量越多, 动孔隙压增长越迅速, 样品易液化, 动剪应力减小更加明显, 动应力和动弹性模量更大, 动阻尼减小。裴向军等^[81]的室内饱水静三轴、单向和双向动三轴试验结果表明, 大光包滑坡的层间错动带

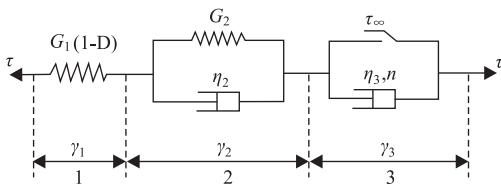


图 2 黏弹塑性蠕变损伤本构模型示意图^[77]

具有较强的液化潜能,双向振动荷载下液化速率更快。

4 软弱夹层与泥化夹层的区别与联系

本节以构造成因为主的泥化夹层为例,分析其与软弱夹层的区别和联系。图 3 展示了“厚层砂岩+薄层黏土岩+厚层砂岩”岩层组合中黏土岩泥化的关键过程。薄层黏土岩是软弱夹层,富含黏土类

物质,泥质结构,呈致密块状,渗透性弱(图 3(a))。层间剪力产生层间错动,破坏了黏土岩的原生结构构造,形成很多节理(图 3(b))。随着层间剪切位移逐渐增大,当软弱夹层相对厚时,在黏土岩与上、下砂岩接触界面之间或黏土岩的中央位置形成劈理带和错动面(图 3(c)),当软弱夹层较薄时,其全部成为劈理带。黏土岩具有显著塑性变形的特点,其形成的劈理常呈鳞片状或揉曲排列^[44]。劈理和微裂隙发育为地下水循环及水岩物理化学作用创造了有利条件,使劈理带和错动面逐渐泥化形成泥化夹层(图 3(d))。以上分析表明,经过泥化作用,部分(或全部)原生软弱夹层演变成泥化夹层,使软弱夹层产生构造分带现象,如葛洲坝水电站坝基软弱夹层分为节理带、劈理带和泥化夹层(图 4)。

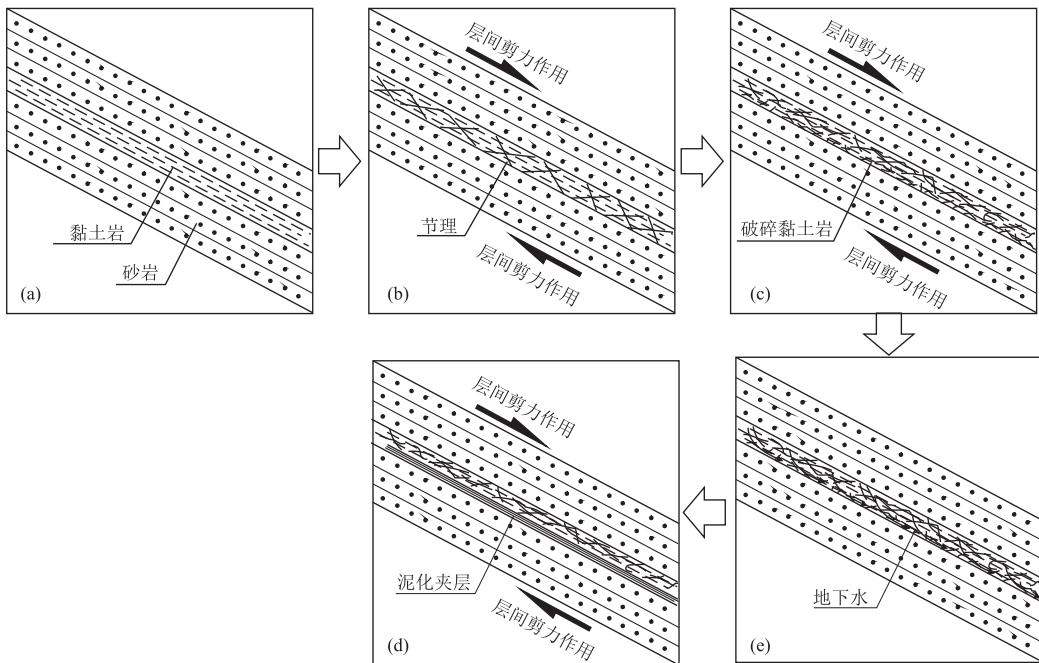


图 3 黏土岩的泥化过程示意图

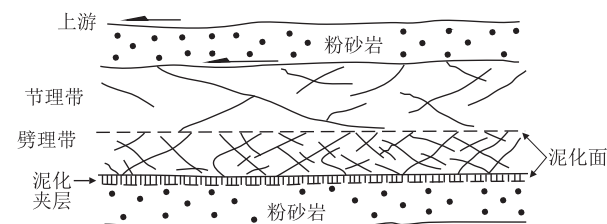


图 4 葛洲坝水电站坝基 227# 夹层剖面结构构造示意图^[44]

综合以上分析认为,软弱夹层是泥化夹层的物质基础,从广义上看,泥化夹层是软弱夹层的一部分,泥化夹层厚度小于软弱夹层,泥化作用使原生软弱夹层丧失了地质历史时期所形成的“岩性”结构构造,变成了具有黏粒和黏土矿物含量及含水率高、干

容重小、强度低、遇水软化且对水更加敏感、塑性和流变性强的近似“泥土”的弹-黏性结构分散体系^[8,74]。此外,泥化夹层形成以后,在多期构造应力的剪切挤压下(图 3(e))其处于高度密实和低孔隙状态^[56]。

5 既有研究存在的不足之处

我国地域辽阔,地形地貌、地质构造和地层岩性复杂多变,虽然对软弱夹层和泥化夹层的研究取得了重要进展,但这些进展仍是不均衡的,研究成果的深度和广度均有待提高。此外,一些工程师对泥化夹层还是不够重视,由软弱夹层和泥化夹层造成的

危害和损失仍然比较突出。因此,进一步开展相关研究不仅具有重要的科学意义,而且具有实际工程意义。

(1) 既有研究主要集中于当前状态下软弱夹层的工程地质特征。

岩石工程地质性质的研究,不仅限于其物理力学指标的确定,尚应研究其演化过程及影响因素。目前,软弱夹层工程地质特性研究主要集中于当前状态下的结构、构造、物质组成、物理-水理-力学性质方面。泥化夹层形成的总揽框架基本清晰,但对泥化过程的详细演变特征和泥化夹层演化趋势的认识尚不深入。软弱夹层形成泥化夹层的泥化演化过程特征是大型层状岩质斜坡失稳机制研究的关键科学问题^[3],开展这些研究对岩体稳定性评价具有重要的工程意义。

(2) 软弱夹层的空间分布研究主要集中在定性描述和规律总结方面。

既有研究主要从厚度、层数和延伸性方面定性描述软弱夹层的空间分布,研究水平有待提高。软弱夹层的空间分布研究不仅对评价边坡稳定性具有十分重要的意义,而且对研究泥化夹层的形成过程有重要启示作用。

(3) 软弱夹层的力学性质研究以其静力学特性为主。

软弱夹层的力学性质研究主要以独立的软弱夹层为研究对象,以静力学宏观特性为主要内容。软弱夹层蠕变模型的研究以元件模型为主。

材料的流变特性包括蠕变、应力松弛和长期强度。软弱夹层的流变特性研究集中在蠕变和长期强度方面,蠕变模型研究以元件模型和经验模型居多,它们在蠕变机制解释和通用性方面略有不足,应加强理论模型研究^[8]。含软弱夹层岩质边坡的变形过程和破坏失稳模式除与软弱夹层有关外,还受软弱夹层与上下围岩接触面及组合岩体的力学特性影响^[82]。在我国地震多发区,软弱夹层对边坡动力稳定性常起到控制作用^[83],只有查明软弱夹层的动力学特性,才能更好地揭示含软弱夹层岩质边坡的动力响应规律。含软弱夹层岩质边坡在开挖扰动下也经常发生失稳^[84]。开挖卸荷使得开挖面附近岩体的应力重新分布,形成开挖扰动区(松弛区),岩体力学性能劣化而产生边坡失稳。综上所述,为更好地解决由软弱夹层引起的工程地质问题,未来应以组合岩体为研究对象,开展软弱夹层的蠕变理论模型、动力学特性和应力松弛特性研究。

6 未来需深入研究的方向

(1) 软弱夹层的泥化演化过程及泥化夹层的演化趋势研究。

从微观结构和构造特征、物质组成、物理和力学性质方面,详尽系统地开展软弱夹层泥化阶段和泥化演变过程特征研究;研究特殊环境条件下泥化夹层的演化趋势。

(2) 软弱夹层(广义的)的三维空间分布及可视化研究。

基于钻探和钻孔全孔壁光学成像资料,采用GOCAD等软件构建软弱夹层的三维空间分布模型,实现软弱夹层三维可视化。基于开挖断面(剖面),采用三维激光扫描技术研究软弱夹层的三维空间分布和层面形态特征。

(3) 软弱夹层的剪切蠕变理论模型,细观损伤破坏动态演变规律,应力松弛特性和动力学特性研究;软弱夹层与围岩间的接触面及组合岩体的力学特性研究。

开展组合岩体的三轴压缩和剪切试验,研究应力-应变关系、强度特征和变形破坏模式等;结合力学试验系统和工业CT扫描仪,研究软弱夹层的细观渐进损伤破坏动态演化规律及其与宏观力学行为的关系;研究软弱夹层的压缩应力松弛特性、剪切应力松弛特性及其影响因素;研究软弱夹层的动力本构关系和剪切蠕变理论模型。

7 结论

(1) 软弱夹层的定义有广义和狭义之分,软弱夹层是泥化夹层的物质基础,泥化夹层是已经泥化了的软弱夹层,属于广义软弱夹层的一部分。软弱夹层的分类方案有很多,按成因、颗粒组成和破碎程度分是使用最广泛的分类方法,而泥化夹层主要基于粒度成分进行分类。

(2) 软弱夹层和泥化夹层的空间分布研究主要集中在定性描述方面,泥化夹层厚度小于软弱夹层。

(3) 泥化夹层的形成受软弱夹层的岩性、矿物成分、岩层组合关系、构造运动和水文地质条件共同影响,其形成模式主要有3种,分别是构造和地下水作用、风化作用、动力变质作用,第一种最普遍。

(4) 软弱夹层的研究集中在岩性、沉积环境,结构构造,物理、水理和化学性质,剪切特性,流变特性和破坏方式方面;泥化夹层的研究集中于物质组成,结构和构造,物理、水理和化学性质,剪切特性,流变特性和动力特性方面。泥化夹层丧失了“岩性”结构

构造特征,工程地质性质比原生软弱夹层差,已成为近似泥土的弹黏性体系。

(5) 未来应深入以下几方面的研究:软弱夹层的泥化演化过程及泥化夹层的演化趋势;软弱夹层的三维空间分布及可视化;软弱夹层的剪切蠕变理论模型,细观损伤破坏动态演变规律,应力松弛特性和动力学特性;软弱夹层与围岩间的接触面及组合岩体的力学特性。

参考文献

- [1] 葛修润. 岩体中节理面、软弱夹层等的力学性质和模拟分析方法(一)[J]. 岩土力学, 1979, (1): 54-75.
- [2] 段淑倩, 冯夏庭, 江权, 等. 高地应力下白鹤滩地下洞室群含错动带岩体破坏模式及机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(4): 852-864.
- [3] 朱赛楠, 殷跃平, 李滨. 大型层状基岩滑坡软弱夹层演化特征研究——以重庆武隆鸡尾山滑坡为例[J]. 工程地质学报, 2018, 26(6): 1638-1647.
- [4] 祝艳波, 余宏明, 付克俭, 等. 红层软岩泥化夹层土水特征曲线影响因素[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2013, 44(7): 2919-2926.
- [5] 黄润秋. 20世纪以来中国的大型滑坡及其发生机制[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(3): 433-454.
- [6] 史文兵, 赵娟. 软弱基座型危岩崩塌调查评价与防治[J]. 贵州大学学报(自然科学版), 2014, 31(5): 40-42.
- [7] 曲永新, 单世桐, 徐晓岚, 等. 某水利工程泥化夹层的形成及变化趋势的研究[J]. 地质科学, 1977, (4): 363-371.
- [8] 徐鼎平, 冯夏庭, 崔玉军, 等. 含层间错动带岩体的破坏模式及其剪切特性研究方法探讨[J]. 岩土力学, 2012, 33(1): 129-136.
- [9] 陈志坚, 张勤. 小浪底泥化夹层的工程地质研究——成因机制及分布规律剖析[J]. 河海科技进展, 1993, 13(3): 73-76.
- [10] 吕濂. 501-1工程坝基的泥化板岩夹层问题[J]. 水文地质工程地质, 1957, (9): 28-31.
- [11] 地质矿产部地质辞典办公室. 地质大辞典[M]. 北京: 地质出版社, 2005: 423-424.
- [12] 中华人民共和国水利部. 岩土工程基本术语标准(GB/T50279-2014)[S]. 北京: 中国计划出版社, 2014.
- [13] 王桂容. 关于软弱夹层几个主要工程地质问题的研究现状[J]. 水利水电技术, 1987, (11): 20-26.
- [14] 谭超, 潘国耀, 刘宗祥, 等. 川东红层丘陵区软弱夹层工程特性[J]. 四川地质学报, 2011, 31(2): 212-214.
- [15] 金德濂. 某坝址软弱夹层的工程地质特征[J]. 水文地质工程地质, 1960, (6): 26-28.
- [16] 简文星, 殷坤龙, 马昌前, 等. 万州侏罗纪红层软弱夹层特征[J]. 岩土力学, 2005, 26(6): 901-905.
- [17] 肖拥军, 殷坤龙, 黄学斌, 等. 巴东新城白土坡深层岩体软弱夹层地质特征[J]. 水文地质工程地质, 2007, (6): 72-75.
- [18] 徐开祥, 潘伟, 林坚. 链子崖危岩体岩体结构及软弱夹层的工程地质研究[J]. 中国地质灾害与防治学报, 1991, 2(3): 44-55.
- [19] 郭金华, 余素玉, 刘东健. 湖北省高坝洲水电枢纽坝基软弱夹层沉积分布规律[J]. 水文地质工程地质, 1994, (5): 17-21.
- [20] 项伟. 软弱夹层微结构研究及其力学意义[J]. 地球科学, 1985, 10(1): 165-169.
- [21] 苏爱军, 晏同珍. 乌江彭水水利枢纽坝区软弱夹层研究[J]. 地球科学, 1989, 14(2): 199-206.
- [22] 葛修润. 岩体中节理面、软弱夹层等的力学性质和模拟分析方法(续)[J]. 岩土力学, 1979, (2): 59-72.
- [23] 郭志. 起伏结构面内软弱夹层厚度的力学效应[J]. 水文地质工程地质, 1982, (1): 34-36.
- [24] 符文熹, 聂德新, 尚岳全, 等. 软弱夹层工程地质性质的室内仿真研究[J]. 浙江大学学报(工学版), 2003, 37(1): 3-6.
- [25] 王义军, 李天斌, 王宝国. 某滑坡软弱夹层抗剪强度取值方法的研究[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2004, 15(4): 28-32.
- [26] Ma C, Zhan H B, Zhang T, et al. Investigation on shear behavior of soft interlayers by ring shear tests[J]. Engineering Geology, 2019, (254): 34-42.
- [27] 许宝田, 阎长虹, 陈汉永, 等. 边坡岩体软弱夹层力学特性试验研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(11): 3077-3081.
- [28] 许宝田, 阎长虹, 刘军照, 等. 边坡岩体软弱夹层剪切变形本构模型研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(增刊2): 65-69.
- [29] 陈宾, 周乐意, 赵延林, 等. 干湿循环条件下红砂岩软弱夹层微结构与剪切强度的关联性[J]. 岩土力学, 2018, 39(5): 1633-1642.
- [30] 张奇华, 彭光忠. 链子崖危岩体软弱夹层的蠕变性质研究[J]. 岩土力学, 1997, 18(1): 60-64.
- [31] 王祥秋, 高文华, 杨林德, 等. 边坡滑移面软弱夹层时间效应与相关特性的试验研究[J]. 湘潭矿业学院学报, 2002, 17(1): 65-68.
- [32] 王志俭, 殷坤龙, 简文星. 万州区红层软弱夹层蠕变试验研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(增刊): 40-44.
- [33] 程强, 周德培, 封志军. 典型红层软岩软弱夹层剪切蠕变性质研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(增刊1): 3176-3180.
- [34] 王宇, 李建林, 刘锋. 坝基软弱夹层剪切蠕变及其长期强度试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(增刊2): 3378-3384.
- [35] Ma C, Zhan H B, Yao W M, et al. A new shear rheological model for a soft interlayer with varying water content[J]. Water Science and Engineering, 2018, 11(2): 131-138.
- [36] 宋彦琦, 李名, 刘江, 等. 含不同倾角天然软弱夹层的大理岩破坏试验[J]. 中国矿业大学学报, 2015, 44(4): 623-629.
- [37] Zuo J P, Wang Z F, Zhou H W, et al. Failure behavior of a rock-coal-rock combined body with a weak coal interlayer[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2013, (23): 907-912.
- [38] 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.
- [39] 王东华. 宝珠寺水电工程坝址区泥化夹层的工程地质研究[J]. 西北水电技术, 1986, (2): 1-13.
- [40] 徐国刚. 红色碎屑岩系中泥化夹层组构及强度特性研究[J]. 人民黄河, 1994, (10): 33-37.
- [41] 刘庆军, 金义德, 孙芳, 等. 黄河碛口水利枢纽泥化夹层强度及其影响因素[J]. 华北水利水电学院学报, 2001, 22(4): 33-36.
- [42] 刘会源. 黄河龙门水库坝址区泥化夹层分布规律的初步研究

- [J]. 人民黄河, 1987, (3): 59-64.
- [43] 马国彦, 高广礼. 黄河小浪底坝区泥化夹层分布及其抗剪试验方法的分析[J]. 工程地质学报, 2000, 8(1): 94-99.
- [44] 戴广秀, 凌泽民, 石秀峰, 等. 葛洲坝水利枢纽坝基红层内软弱夹层及其泥化层的某些工程地质性质[J]. 地质学报, 1979, (2): 153-166.
- [45] 王幼麟. 葛洲坝泥化夹层成因及性状的物理化学探讨[J]. 水文地质工程地质, 1980, (4): 1-7.
- [46] 孔德坊, 田金花, 刘静明. 河南小浪底水库三坝址区某些软弱夹层的工程地质研究[J]. 成都地质学院学报, 1983, (3): 64-72.
- [47] 袁之平. 黄河中游地区软弱夹层的初步研究[J]. 水文地质工程地质, 1980, (2): 18-21.
- [48] 李守定, 李晓, 张年学, 等. 三峡库区宝塔滑坡泥化夹层泥化过程的水岩作用[J]. 岩土力学, 2006, 27(10): 1841-1846.
- [49] 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, 1991, 19(1): 73-78.
- [50] 侯建华. 攀枝花兰尖铁矿兰营采场边坡泥化夹层的成因探讨[J]. 四川地质学报, 2003, 23(3): 167-169.
- [51] 谭罗荣. 葛洲坝泥化夹层的物质组成特性[J]. 岩土力学, 1984, 5(2): 27-34.
- [52] 夏德成. 小浪底水库坝址区地质条件对泥化夹层空间分布的控制作用[J]. 水利水电技术, 1991, (9): 50-54.
- [53] Zhao Y, Cui Y J, Zhou H, et al. Effects of void ratio and grain size distribution on water retention properties of compacted infilled joint soils[J]. Soils and Foundations, 2017, (57): 50-59.
- [54] 蒋小伟, 万力, 宋刚, 等. 玄武岩体及其层间错动带的渗透性特征[J]. 工程勘察, 2008, (10): 25-29.
- [55] 胡启军, 何松晟, 叶涛, 等. 泥化夹层细观组构参数的量化方法[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2017, 28(3): 137-146.
- [56] 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.
- [57] 项伟. 粘粒含量对泥化夹层抗剪强度的影响[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 1984, 20(3): 121-125.
- [58] 张成恭, 聂德新, 韩文峰. 影响软弱夹层抗剪强度的主要因素及其相关关系研究[J]. 地质灾害与环境保护, 1990, 1(2): 30-33.
- [59] 胡涛, 任光明, 聂德新, 等. 沉积型软弱夹层成因分类及强度特征[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2004, 15(1): 127-131.
- [60] Numelin T, Marone C, Kirby E. Frictional properties of natural fault gouge from a low - angle normal fault, Panamint Valley, California[J]. Tectonics, 2007, 26(2): 1-14.
- [61] Pellet F L, Keshavarz M, Boulon M. Influence of humidity conditions on shear strength of clay rock discontinuities[J]. Engineering Geology, 2013, (157): 33-38.
- [62] 陆有忠, 高永涛, 吴顺川, 等. 泥化夹层残余强度的支持向量机预测[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2008, 27(1): 45-47.
- [63] 董遵德, 袁澄文. 岩体软弱夹层现场慢剪切试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1994, 13(2): 149-159.
- [64] 闫汝华, 樊卫花. 马家岩水库坝基软弱夹层剪切特征及强度[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(22): 3761-3764.
- [65] Morrow C, Shi L Q, Byerlee J. Permeability and strength of San Andreas fault gouge under high pressure[J]. Geophysical Research Letters, 1981, 8(4): 325-328.
- [66] 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.
- [67] 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.
- [68] Xu D P, Feng X T, Cui Y J. A simple shear strength model for interlayer shear weakness zone[J]. Engineering Geology, 2012, (147): 114-123.
- [69] 赵阳, 周辉, 冯夏庭, 等. 高压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.
- [70] 段淑倩, 冯夏庭, 江权, 等. 不同先期固结压力下的错动带力学特性研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(1): 49-60.
- [71] 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.
- [72] 郝小红, 任冠松. 玄武岩岩体层间错动带变形机制研究[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2014, 35(5): 33-37.
- [73] 孟祥瑞, 裴向军, 黄润秋, 等. 大光包滑坡层间错动带岩体剪切特性研究[J]. 工程地质学报, 2018, 26(2): 309-318.
- [74] 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.
- [75] 肖树芳. 泥化夹层蠕变全过程的模型及微结构的变化[J]. 岩石力学与工程学报, 1987, 6(2): 113-124.
- [76] 杨天鸿, 芮勇勤, 朱万成, 等. 炭质泥岩泥化夹层的流变特性及长期强度[J]. 实验力学, 2008, 23(5): 396-402.
- [77] 陈兴周, 李建林, 柴军瑞, 等. 坝肩高边坡层间错动带剪切蠕变特性与模型研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(9): 1675-1682.
- [78] 薛守义, 王思敬. 小浪底工程中原状泥化夹层的动三轴试验[J]. 岩土工程学报, 1997, 19(2): 92-97.
- [79] 俞培基, 秦蔚琴, 王宏. 山体岩石泥化夹层的动力抗剪强度[J]. 水力发电学报, 1993, (1): 64-70.
- [80] 朱凌, 裴向军, 崔圣华, 等. 基于动三轴试验的大光包滑坡层间错动带动力特性研究[J]. 工程地质学报, 2018, 26(3): 647-654.
- [81] 裴向军, 朱凌, 崔圣华, 等. 大光包滑坡层间错动带液化特性及滑坡启动成因探讨[J]. 岩土力学, 2019, 40(3): 1085-1096.
- [82] 许宝田, 钱七虎, 阎长虹, 等. 多层软弱夹层边坡岩体稳定性及加固分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(增2): 3959-3964.
- [83] 闫孔明, 刘飞成, 朱崇浩, 等. 地震作用下含倾斜软弱夹层斜坡场地的动力响应特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(11): 2686-2698.
- [84] Xue D M, Li T B, Zhang S A, et al. Failure mechanism and stabilization of a basalt rock slide with weak layers[J]. Engineering Geology, 2018, (233): 213-224.