

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2019.110>



岩石/结构面劣化导致巴东组软硬互层 岩体强度劣化的作用机制

亢金涛¹, 吴琼^{1*}, 唐辉明¹, 胡新丽¹, 范亮亮¹, 张抒², 易鑫¹

1. 中国地质大学工程学院, 湖北武汉 430074

2. 中国地质大学教育部长江三峡库区地质灾害研究中心, 湖北武汉 430074

摘要: 岩石/结构面劣化导致巴东组软硬互层岩体强度劣化的作用机制是揭示三峡库区库岸消落带巴东组软硬互层岩体强度渐进劣化机理和评价库岸边坡稳定性的关键问题。以三峡库区典型“易滑岩组”巴东组第二段红色系列的砂岩与粉砂质泥岩互层岩组为研究对象, 考虑干湿循环条件下岩石/结构面参数劣化, 开展了软硬互层岩体单轴压缩数值试验, 分析了软岩/硬岩/层面劣化对巴东组软硬互层岩体单轴压缩强度劣化的贡献度及其与岩层倾角的关系。研究表明, 不同岩层倾角条件下, 软岩/硬岩/层面劣化对巴东组软硬互层岩体单轴压缩强度劣化的影响有明显区别, 以软岩/硬岩/层面劣化对巴东组软硬互层岩体单轴压缩强度劣化的贡献度为依据, 将岩层倾角全范围划分为软岩控制区、软岩—硬岩—层面共同控制区、沿层面滑移失稳破坏区和硬岩控制区, 揭示了岩石/结构面劣化导致巴东组软硬互层岩体强度劣化的作用机制及其受岩层倾角的影响, 为进一步研究库岸消落带巴东组软硬互层岩体强度渐进劣化机理奠定了基础。

关键词: 巴东组; 软硬互层岩体; 强度劣化; 单轴压缩强度; 岩层倾角; 工程地质。

中图分类号: P64

文章编号: 1000-2383(2019)11-3950-11

收稿日期: 2018-02-21

Strength Degradation Mechanism of Soft and Hard Interbedded Rock Masses of Badong Formation Caused by Rock/Discontinuity Degradation

Kang Jintao¹, Wu Qiong^{1*}, Tang Huiming¹, Hu Xinli¹, Fan Liangliang¹, Zhang Shu², Yi Xin¹

1. Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. Three Gorges Research Center for Geo-Hazards, Ministry of Education, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

Abstract: Strength degradation mechanism of soft and hard interbedded rock mass of Badong Formation caused by rock/discontinuity degradation is the key issue to reveal progressive strength deterioration mechanism of soft and hard interbedded rock mass of Badong Formation in hydro-fluctuation belt of reservoir bank and to evaluate the stability of reservoir bank slope in the Three Gorges area. Sandstone and silty mudstone of the typical sliding-prone soft and hard interbedded rock masses of Badong Formation in the Three Gorges area were taken as the research object to conduct uniaxial compression numerical test, considering the deterioration of rock/discontinuity parameters under the condition of drying-wetting cycle, the contribution of soft rock/hard rock/bedding plane degradation to the uniaxial compression strength degradation of soft and hard interbedded rock masses in the

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(No. 41877259); 湖北省自然科学基金面上项目(No. 2018CFB666); 国家重点研发计划项目(No. 2017YFC1501301); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(No. CUGQY1929); 国家自然科学基金青年项目(No. 41807271)。

作者简介: 亢金涛(1992-), 男, 硕士研究生, 主要从事岩体结构与岩体力学参数研究。ORCID: 0000-0002-8813-4155。E-mail: 412935244@qq.com

***通讯作者:** 吴琼, ORCID: 0000-0001-5029-5925。E-mail: wuqiong@cug.edu.cn

引用格式: 亢金涛, 吴琼, 唐辉明, 等, 2019. 岩石/结构面劣化导致巴东组软硬互层岩体强度劣化的作用机制. 地球科学, 44(11): 3950-3960.

Badong Formation and its relationship with the dip angle are analyzed. The results indicate that the influence of soft rock/hard rock/bedding plane deterioration on the uniaxial compression strength degradation of soft and hard interbedded rock mass in the Badong Formation has obvious difference under different dip angles. The dip angle is divided into soft rock control zone, soft rock-hard rock-bedding plane common control zone, slip failure zone along the bedding plane and hard rock control zone based on their contribution. The results reveal the mechanism of strength degradation of soft and hard interbedded rock mass caused by rock/discontinuity deterioration and the influence of dip angle, which provides the basis for revealing the progressive strength deterioration mechanism of soft and hard interbedded rock masses of the Badong Formation in hydro-fluctuation belt of reservoir bank.

Key words: Badong Formation; soft and hard interbedded rock mass; strength deterioration; uniaxial compressive strength; dip angle; engineering geology.

0 引言

三峡库区巴东组地层主要分布于鄂西和渝东地区,是三峡库区典型的“易滑地层”(晏同珍, 1994),由于沉积旋回的作用,巴东组地层表现为软硬互层状结构.自三峡水库蓄水以来,以滑坡为主的地质灾害活动加剧,研究表明,降雨和库水位变动是影响库区滑坡运动的重要因素(向菲菲等, 2018; Tang *et al.*, 2019).三峡库区库岸消落带范围内的岩体长期处于周期性饱和与疏干动态交替的环境中,将加速库水对岩体的劣化效应,导致岩体强度降低,对库岸边坡稳定性具有重要影响.由于巴东组软硬互层岩体中碳酸盐矿物等易溶组分和泥质矿物等软弱组分所占比例较大(殷跃平和胡瑞林, 2004; 李华亮等, 2006),库水升降对巴东组岩体强度的劣化作用与一般岩体相比更为强烈.因此,研究库岸消落带巴东组软硬互层岩体强度劣化机制,可为巴东组岸坡长期稳定性研究提供理论依据.

目前,巴东组岩体的工程地质性质及强度劣化机制开始受到学者们的关注, Deng *et al.* (2000), 滕伟福等(2005)开展了巴东组岩体的工程地质性质研究,并指出水对巴东组岩体强度的劣化作用明显;余宏明等(2002),殷跃平和胡瑞林(2004),吴益平等(2006),申培武等(2017)从微观及宏观角度探讨了巴东组紫红色泥岩遇水崩解软化的机制;简文星等(2015)研究了巴东组软岩在干湿循环作用下抗剪强度的劣化规律;方堃等(2014)以巴东组典型软岩与硬岩间岩层层面为研究对象,基于 PFC 数值试验研究了巴东组典型异性层面剪切特性,与此同时, Wu *et al.* (2018, 2019)以巴东组典型异性层面为原型,开展相似材料物理模型试验,提出了异性层面峰值抗剪强度估算公式.上述研究成果为本文开展巴东组软硬

互层岩体强度劣化的作用机制研究奠定了基础.

现阶段,干湿循环作用下软硬互层岩体强度劣化的研究很少,现有研究仅涉及岩石或层面的性质劣化,如:张振华等(2017),张景昱等(2017),刘新荣等(2017),邓华锋等(2016)通过开展室内试验,研究了干湿循环作用下三峡库区砂岩、红层软岩等的强度或变形参数劣化规律;曾胜等(2013)研究了干湿循环作用下层强度参数衰减规律,并将其应用于红砂岩顺层岩质边坡稳定性分析.一些学者通过室内试验或数值模拟研究了软硬互层岩体的强度性质,如 Tien and Kuo (2001), Tien *et al.* (2006)开展了软硬互层类岩石材料的模型试验,研究了岩层倾角对岩体整体强度和弹性模量的影响;梁正召等(2005),陈宇龙等(2017),李昂等(2014)运用数值模拟软件研究了软硬互层岩体在不同岩层倾角条件下的单轴压缩或三轴压缩破坏过程,分析了其力学性质和破坏模式.但是上述研究均未涉及干湿循环作用下软硬互层岩体强度的劣化机制.

软硬互层岩体强度由软岩、硬岩以及层面共同控制,其劣化机制也非常复杂,通过现场试验或室内试验的难度较大,所以本文借助三维离散元软件 3DEC,以三峡库区库岸消落带巴东组软硬互层岩性为研究对象,分析不同岩层倾角条件下软岩/硬岩/层面劣化对巴东组软硬互层岩体单轴压缩强度劣化的影响规律和贡献度,揭示巴东组典型软硬互层岩体强度劣化的作用机制,为科学确定巴东组岩体强度参数、合理评价岸坡稳定性提供理论依据.

1 巴东组软硬互层岩体岩性组合特征

巴东组地层属海退序列兼有振荡运动形式下

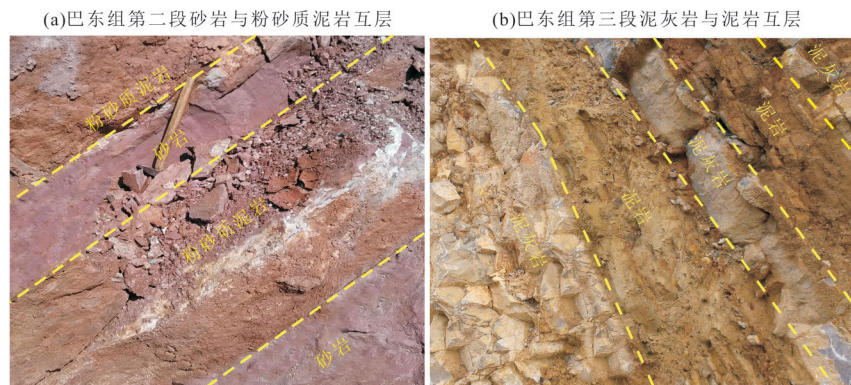


图1 巴东组典型软硬互层岩组

Fig. 1 Typical soft and hard interbedded rock masses in Badong Formation

形成的滨—浅海相不纯碳酸盐岩、泥砂岩建造(李华亮等, 2006), 由于沉积旋回的作用, 巴东组地层中常见不同岩性的交替变化, 表现为软岩与硬岩互层状结构. 典型的巴东组软硬互层“易滑岩组”有 2 类(晏同珍, 1994; 唐辉明等, 2002; 姚池等, 2015), 一类是巴东组第二段红色系列的砂岩与粉砂质泥岩互层岩组(图 1a), 另一类是巴东组第三段灰色系列的泥质灰岩与泥岩互层岩组(图 1b).

根据课题组前期研究成果, 巴东组第二段粉砂质泥岩和砂岩结构较松散, 孔隙较多且密集, 形状不规则, 微裂隙发育, 其中粉砂质泥岩所含矿物主要为石英、方解石及粘土类矿物, 砂岩的矿物成分与粉砂质泥岩相似, 区别是含有较少的粘土矿物; 巴东组第三段泥质灰岩的孔隙及微裂隙较少, 岩石的颗粒直径非常小且颗粒之间结合紧密, 矿物成分以方解石为主, 含有少量石英, 几乎不含粘土矿物; 巴东组第三段泥岩结构松散, 孔隙较多, 岩石颗粒形状不规则, 呈碎屑状, 岩石颗粒直径很小且颗粒细碎, 矿物成分与巴东组第二段粉砂质泥岩相似, 区别是石英含量较高.

由于巴东组第二段红色系列的砂岩与粉砂质泥岩互层岩组结构较为松散, 孔隙较多, 发育有微裂隙, 且粘土矿物含量较高, 所以岩体强度受干湿循环劣化作用会更加明显, 且三峡库区岩质库岸边坡稳定问题中红层软岩类库岸边坡变形破坏尤为明显(李守定等, 2004; 简文星等, 2005; 邓华锋等, 2016). 基于此, 选取巴东组第二段红色系列的砂岩与粉砂质泥岩互层岩组开展试验, 开展岩石/结构面劣化导致巴东组软硬互层岩体强度劣化的作用机制研究.

2 巴东组软硬互层岩体强度劣化研究

2.1 数值模型建立及参数选取

3DEC (3-Dimension Distinct Element Code) 是一款以离散单元法作为基本理论来描述离散介质力学行为的计算分析程序. 软件采用的离散单元法适用于解决不连续介质问题的数值模拟, 特别适用于节理岩体的应力分析. 在进行数值分析的时候, 最关键的几个问题是几何模型的建立、本构关系的选择以及力学参数的选取(刁心宏等, 1999). 采用 3DEC 软件建立巴东组软硬互层岩体数值模型, 模型尺寸为 $1.0\text{ m} \times 1.0\text{ m} \times 1.0\text{ m}$, 粉砂质泥岩、砂岩层厚均为 0.1 m , 为了研究岩层倾角(β)的影响, β 取值以 5° 为间隔在 $0^\circ \sim 90^\circ$ 变化(分区界限附近 β 取值适当加密), 典型数值模型如图 2 所示. 岩石采用摩尔—库伦塑性本构模型, 层面采用层面接触—库伦—滑移模型. 根据前期的研究成果(曾胜等, 2013; 邓华锋等, 2016; 傅晏等, 2017), 干湿循环作用下岩石/结构面的强度参数劣化趋势明显, 且在干湿循环初期岩石/结构面的强度参数劣化速率快, 后期劣化趋势逐渐趋缓, 并建立了典型的岩石/结构面强度参数随干湿循环的劣化方程. 基于巴东组岩石/结构面的初始参数和同类典型岩石/结构面强度参数劣化方程, 确定巴东组粉砂质泥岩/砂岩/层面在不同干湿循环次数下的强度参数, 如表 1 所示. 此外, 粉砂质泥岩密度为 $2\,258.79\text{ kg/m}^3$, 体积模量为 0.514 GPa , 剪切模量为 0.222 GPa ; 砂岩的密度为 $2\,596.06\text{ kg/m}^3$, 体积模量为 5.59 GPa , 剪切模量为 3.75 GPa ; 二者间层面的法向刚度为 5.2 GPa/m , 剪切刚度为 0.68 GPa/m , 且假定变形参数保持恒定.

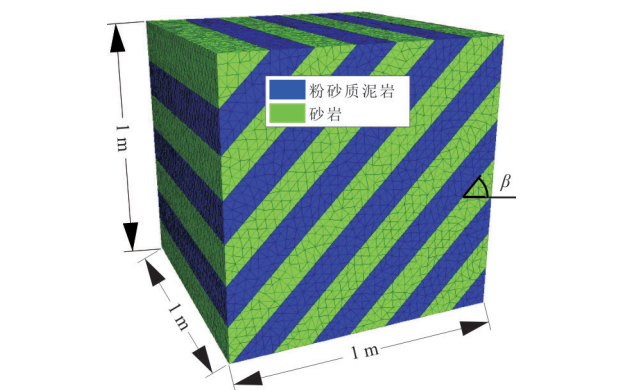


图2 典型数值计算模型($\beta=45^\circ$)
Fig. 2 Typical numerical calculation model ($\beta=45^\circ$)

为分别研究粉砂质泥岩/砂岩/层面劣化对巴东组典型软硬互层岩体单轴压缩强度劣化的影响规律及贡献度,数值试验中分别设计了粉砂质泥岩/砂岩/层面同时劣化、仅考虑粉砂质泥岩劣化、仅考虑砂岩劣化以及仅考虑层面劣化4种试验,其中岩层倾角 β 为 $0^\circ, 5^\circ, 10^\circ, 15^\circ, 20^\circ, 25^\circ, 30^\circ, 35^\circ, 40^\circ, 45^\circ, 50^\circ, 55^\circ, 60^\circ, 65^\circ, 70^\circ, 75^\circ, 80^\circ, 85^\circ, 90^\circ$ 时,开展巴东组软硬互层岩体在干湿循环0次的单轴压缩数值试验,研究软硬互层岩体强度与岩层倾角间的关系.根据试验结果及贡献度分区需要进而选取岩层倾角 β 为 $0^\circ, 10^\circ, 20^\circ, 22^\circ, 23^\circ, 24^\circ, 25^\circ, 26^\circ, 27^\circ, 28^\circ, 75^\circ, 77^\circ, 78^\circ, 80^\circ, 85^\circ, 90^\circ$ 时,考虑4种劣化条件,开展巴东组软硬互层岩体在干湿循环0,1,3,5,7,10,15次的单轴压缩数值试验,研究粉砂质泥岩/砂岩/层面劣化对巴东组软硬互层岩体单轴压缩强度的影响规律及贡献度.模型的层面用jset命令生成,通过赋予块体不同的参数值,实现软硬互层岩体

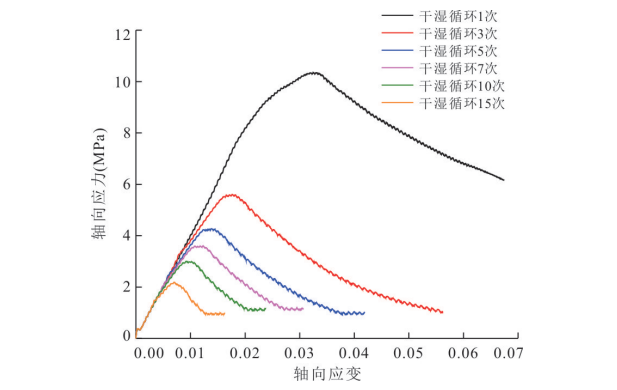


图3 不同干湿循环次数下巴东组软硬互层岩体模型应力—应变曲线(0° 倾角)
Fig. 3 Stress-strain curves of the soft and hard interbedded rock masses in Badong Formation under different drying-wetting cycles($\beta=0^\circ$)

(图2),数值模型建立后,以位移加载方式在模型顶面 z (轴向)方向加载(0.02 m/s),并固定下表面在 z 方向的位移,在整个加载过程中,记录模型顶面9个监测点 z 方向的应力—应变曲线,得到不同试验条件下岩体的平均单轴压缩强度,进而分析岩石/结构面劣化导致巴东组软硬互层岩体强度劣化的作用机制.图3为监测得到不同干湿循环次数下巴东组软硬互层岩体模型(0° 倾角)应力—应变曲线.

2.2 试验结果

2.2.1 软岩/硬岩劣化对巴东组软硬互层岩体强度劣化的贡献度 巴东组软硬互层岩体在干湿循环作用前的初始单轴压缩强度随岩层倾角的变化曲线如图4所示.

由图4可以看出,巴东组软硬互层岩体的单轴压缩强度随岩层倾角 β 的增大先减小后增大,曲线

表1 不同干湿循环次数下巴东组粉砂质泥岩/砂岩/层面强度参数值
Table 1 Strength parameters of silty mudstone/sandstone/bedding plane in Badong Formation under different drying-wetting cycles

		干湿循环 0次	干湿循环 1次	干湿循环 3次	干湿循环 5次	干湿循环 7次	干湿循环 10次	干湿循环 15次
粉砂质 泥岩	粘聚力(MPa)	2.28	1.17	0.79	0.67	0.59	0.50	0.39
	内摩擦角($^\circ$)	34.8	28.8	19.4	16.6	15.4	14.9	14.6
	抗拉强度(MPa)	1.44	1.35	1.15	0.47	0.25	0.12	0.03
砂岩	粘聚力(MPa)	10.1	6.35	4.99	4.26	3.75	3.19	2.52
	内摩擦角($^\circ$)	45.1	44.3	41.4	39.7	38.5	37.3	35.9
	抗拉强度(MPa)	5.99	3.46	2.71	2.31	2.04	1.74	1.38
层面	粘聚力(MPa)	0.045	0.040	0.028	0.023	0.021	0.019	0.016
	内摩擦角($^\circ$)	27.0	26.5	25.7	24.9	24.1	23.2	22.1

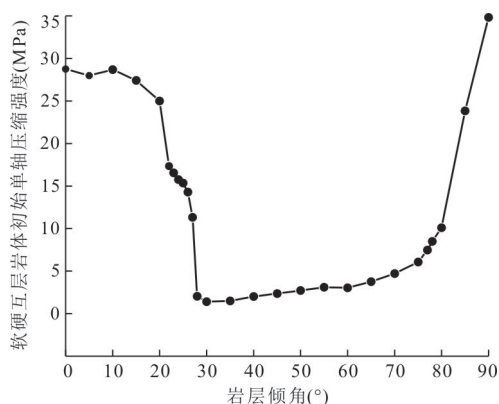


图4 巴东组软硬互层岩体的初始单轴压缩强度随岩层倾角的变化曲线

Fig. 4 Initial uniaxial compressive strength of the soft and hard interbedded rock mass in Badong Formation under different dip angles

呈现两头高中间低的典型“U”形趋势,“U”形底部岩体的单轴压缩强度较小,说明岩层倾角对岩体抗压强度有显著影响.已有研究(梁正召等,2005;张桂民等,2012;贾长贵等,2013;李昂等,2014;陈宇龙等,2017)表明,层状岩体在单轴压缩条件下其破坏模式的理论分析为:当 $\phi_j < \beta < 90^\circ$ 时(ϕ_j 为结构面内摩擦角),试样沿结构面发生剪切破坏,岩体的峰值抗压强度较小;当结构面倾角 $\beta \leq \phi_j$ 以及 $\phi_j = 90^\circ$ 时,试样发生穿切岩石和结构面的复合破坏,岩体将得到相同的单轴抗压强度,但是由于节理岩体的破坏往往包含了沿结构面的滑动剪切破坏和岩体的拉伸劈裂等破坏形式,而理论计算仅仅考虑岩体沿结构面的剪切破坏,所以理论分析结果与试验结果稍有差别.因此,层状岩体在单轴压缩条件下的破坏模式可归结为:当层面倾角较低时,为穿切岩石和层面的复合破坏;在中倾角时,为沿着弱相岩石的剪切破坏,或沿交界面的剪切滑移破坏,因而强度最低;当层面为接近 90° 时,为沿硬相岩石的劈裂破坏.本文研究对象为软硬互层岩体,与上述破坏模式类似,为便于结果的理论分析,下文以软岩代表粉砂质泥岩,硬岩代表砂岩.图5给出了典型岩层倾角条件下软岩/硬岩/层面劣化对巴东组软硬互层岩体强度劣化影响的计算结果.

在岩层倾角为 0° 、 10° 时(图5a,5b),软岩劣化对巴东组软硬互层岩体强度劣化的影响最大,硬岩劣化的影响程度次之.从 0° 倾角试样的塑性破坏区分布图可以看出,破坏区贯穿软岩、硬岩,且软岩中的破坏区分布较多,此时岩体的破坏模式

为穿切岩石和层面的复合破坏,岩体的强度主要由软岩的强度控制(图6).

在岩层倾角为 24° 、 26° 时(图5c,5d),在干湿循环次数较小时,与前述规律类似,随着干湿循环次数增加,岩体强度劣化由软岩劣化控制转为由层面劣化控制.从 24° 倾角试样的塑性破坏区分布图可以看出,干湿循环初期,破坏区主要分布于软岩中(图7a),随着干湿循环次数的增加,层面两侧的破坏区明显增加,且岩体沿层面滑移明显(图7b),相应的岩体破坏模式由沿软岩的剪切破坏转为沿层面的剪切滑移破坏.

在岩层倾角为 80° 、 90° 时(图5e,5f),硬岩劣化对巴东组软硬互层岩体强度劣化的影响程度明显大于软岩,从 90° 倾角试样的塑性破坏区分布图可以看出,破坏区主要分布于硬岩中(图8),此时岩体的破坏模式为沿硬岩的劈裂破坏,岩体强度劣化基本上由硬岩劣化控制.

2.2.2 层面劣化对巴东组软硬互层岩体强度劣化的贡献度 由图5可知,在岩层倾角为 0° 、 10° 、 80° 、 90° 时,层面劣化对巴东组软硬互层岩体强度劣化的影响很小;在岩层倾角为 24° 、 26° 时,层面劣化对巴东组软硬互层岩体强度劣化的影响出现突增的现象,结合表1可以看出,随干湿循环次数的增加,层面的内摩擦角逐渐衰减至低于岩层倾角,岩体的破坏模式从发生穿切岩石和层面的复合破坏过渡到沿层面的剪切滑移破坏,岩体的强度也由岩石强度控制过渡到由层面强度控制,岩体的强度会出现急剧下降.所以在实际库岸边坡工程中,当岩体的岩层倾角接近层面内摩擦角时,由于干湿循环的劣化会使岩体的破坏模式发生转变,导致强度突降造成岸坡失稳,应对此类型的岩体给予重视.

2.2.3 软岩/硬岩/层面劣化对巴东组软硬互层岩体强度劣化的贡献度与岩层倾角的关系 定义干湿循环15次后岩体单轴压缩强度劣化率为 d ,软岩/硬岩/层面劣化对巴东组软硬互层岩体单轴压缩强度劣化的贡献度分别为 C_s 、 C_h 和 C_b ,其计算公式分别为:

$$d = \frac{\sigma_c - \sigma_{c(i)}}{\sigma_c} \times 100\%, \quad (1)$$

$$C_s = \frac{\sum_{i=1}^N \left[\frac{\sigma_c - \sigma_{cs(i)}}{\sigma_c - \sigma_{c(i)}} \right]}{N} \times K \times 100\%, \quad (2)$$

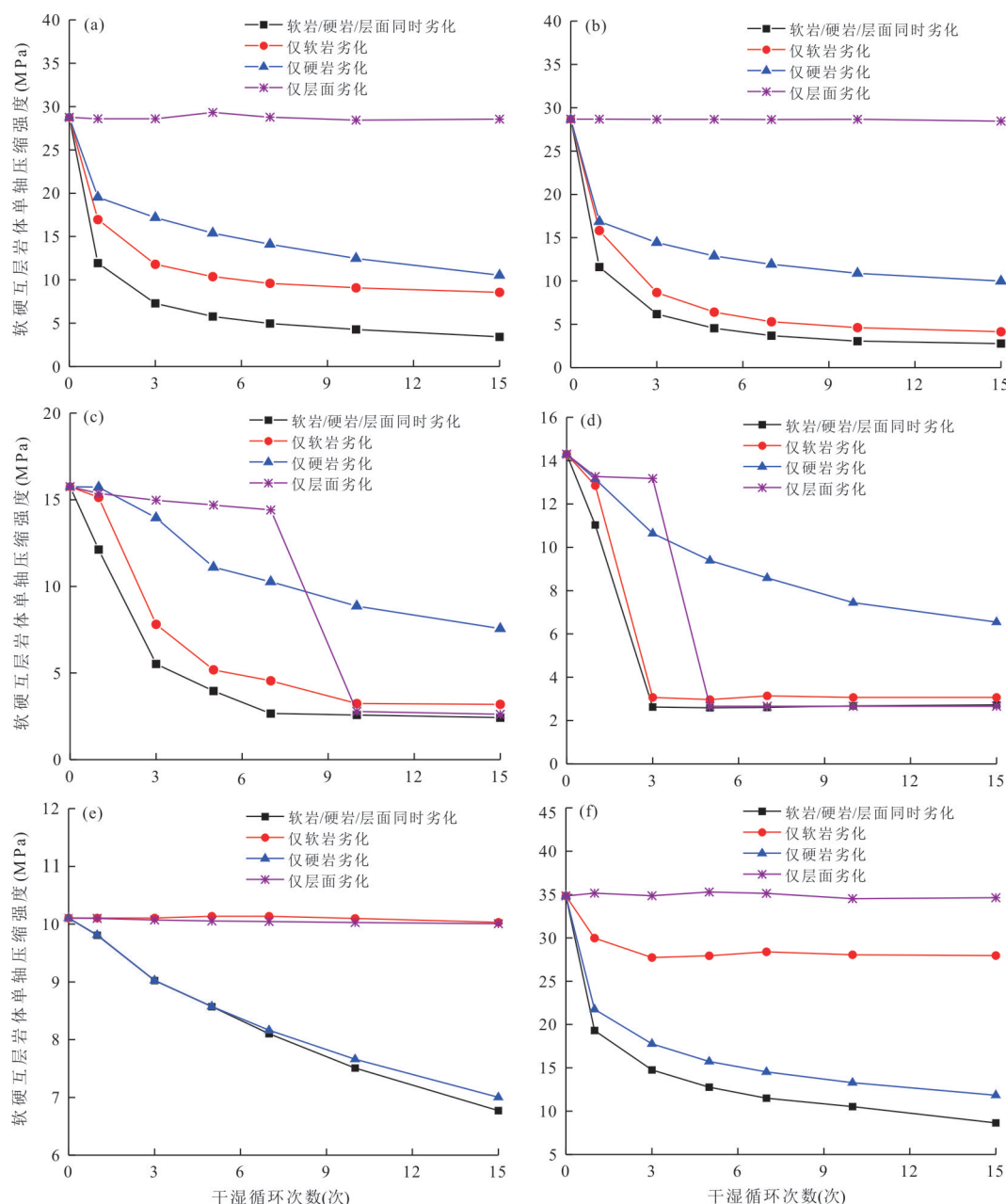


图5 不同岩层倾角条件下软岩/硬岩/层面劣化对巴东组软硬互层岩体强度劣化的影响规律

Fig. 5 Effect of soft rock/hard rock/bedding plane deterioration on the strength deterioration of soft and hard interbedded rock masses in Badong Formation under different dip angles

a. 0°岩层倾角; b. 10°岩层倾角; c. 24°岩层倾角; d. 26°岩层倾角; e. 80°岩层倾角; f. 90°岩层倾角

$$C_h = \frac{\sum_{i=1}^N \left[\frac{\sigma_c - \sigma_{ch(i)}}{\sigma_c - \sigma_{c(i)}} \right]}{N} \times K \times 100\%, \quad (3)$$

$$C_b = \frac{\sum_{i=1}^N \left[\frac{\sigma_c - \sigma_{cb(i)}}{\sigma_c - \sigma_{c(i)}} \right]}{N} \times K \times 100\%. \quad (4)$$

式中: $N=6$, 为单轴压缩试验次数; σ_c 为岩体干湿循环前的初始单轴压缩强度 (MPa); $\sigma_{c(i)}$ 为软岩、硬岩、层面同时劣化条件下, 岩体第 i 次单轴压缩试验的

强度 (MPa); $\sigma_{cs(i)}$ 为仅考虑软岩劣化时, 岩体第 i 次单轴压缩试验的强度 (MPa); $\sigma_{ch(i)}$ 为仅考虑硬岩劣化时, 岩体第 i 次单轴压缩试验的强度 (MPa); $\sigma_{cb(i)}$ 为仅考虑层面劣化时, 岩体第 i 次单轴压缩试验的强度 (MPa); K 为保证 C_s 、 C_h 、 C_b 之和为 1 的折减系数. 不同岩层倾角条件下巴东组软硬互层岩体单轴压缩强度劣化率及软岩/硬岩/层面劣化对岩体强度劣化的贡献度如表 2 所示.

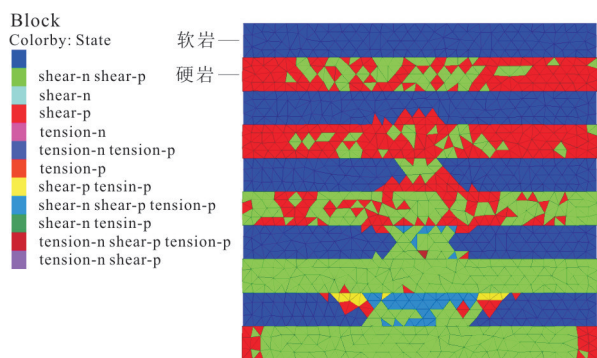


图 6 单轴压缩条件下巴东组软硬互层岩体(0°倾角)

Fig. 6 Distribution of plastic failure zone of soft and hard interbedded rock masses in Badong Formation under uniaxial compression ($\beta=0^\circ$)

塑性破坏区分布图

以表 2 中所列的软岩/硬岩/层面对巴东组软硬互层岩体强度劣化的贡献度数值为依据,将岩层倾角 $0^\circ\sim 90^\circ$ 全范围划分为以下 4 个区间(图 9):

(1) 软岩控制区 ($0^\circ\leq\beta<23^\circ$): 当岩层倾角较小时,干湿循环作用下软岩劣化对巴东组软硬互层岩体单轴压缩强度劣化的贡献度最大,为 $56.06\%\sim 65.05\%$,硬岩劣化的贡献度次之,为 $34.95\%\sim 43.78\%$,层面劣化的贡献度接近 0,可忽略不计.在此区间范围内,软硬互层岩体强度劣化主要由软岩控制.

(2) 软岩—硬岩—层面共同控制区 ($23^\circ\leq\beta<28^\circ$): 当岩层倾角范围接近并小于岩层层面的基本摩擦角时,干湿循环作用下软岩劣化对巴东组软硬互层岩体单轴压缩强度劣化的贡献度为 $42.10\%\sim 53.88\%$,硬岩劣化的贡献度为 $17.08\%\sim 36.40\%$,层

面劣化的贡献度为 $9.72\%\sim 38.47\%$.在此区间范围内,软硬互层岩体的强度劣化由软岩劣化、硬岩劣化和层面劣化共同控制.

(3) 沿层面滑移失稳破坏区 ($28^\circ\leq\beta<78^\circ$): 在不考虑围压的情况下,当岩层倾角大于岩层层面的基本摩擦角时,岩体易沿层面发生滑移破坏,岩体的单轴压缩强度较小,低于岩体最大单轴压缩强度 (90° 岩层倾角, 34.83 MPa) 的 20% ,干湿循环劣化作用对岩体单轴压缩强度影响也很小,干湿循环 15 次后岩体的强度劣化率 $<20\%$.在此区间范围内,软硬互层岩体沿层面滑移失稳破坏.

(4) 硬岩控制区 ($78^\circ\leq\beta\leq 90^\circ$): 当岩层倾角较大时,干湿循环作用下硬岩劣化对巴东组软硬互层岩体单轴压缩强度劣化的贡献度最大,为 $74.07\%\sim 99.21\%$,软岩劣化的贡献度较小,为 $0.26\%\sim 25.64\%$,层面劣化的贡献度小于 3% ,可忽略不计.在此区间范围内,软硬互层岩体的强度劣化由硬岩劣化控制.

上述分区剖析了软岩/硬岩/层面劣化对巴东组软硬互层岩体强度劣化的贡献度及其受岩层倾角的影响,揭示了岩石/结构面劣化导致巴东组软硬互层岩体强度劣化的作用机制,为科学确定巴东组岩体强度参数、合理评价岸坡稳定性提供理论依据.

3 讨论

(1) 由于研究对象的复杂性,本文在开展岩石/结构面劣化导致巴东组软硬互层岩体强度劣化的作用机制时,进行了一系列的简化,如软硬互层岩

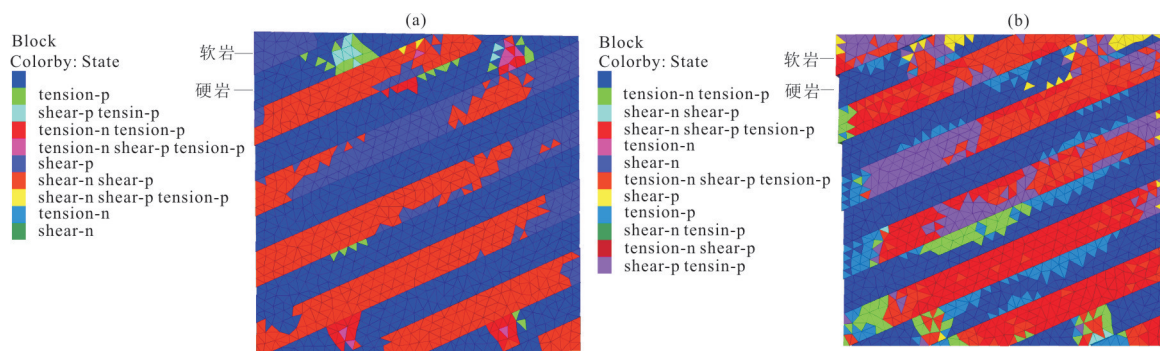


图 7 单轴压缩条件下巴东组软硬互层岩体(24°倾角)

Fig. 7 Distribution of plastic failure zone of soft and hard interbedded rock masses in Badong Formation under uniaxial compression ($\beta=24^\circ$)

塑性破坏区分布图 .a. 干湿循环初期 ($n\leq 7$); b. 干湿循环后期 ($n>7$)

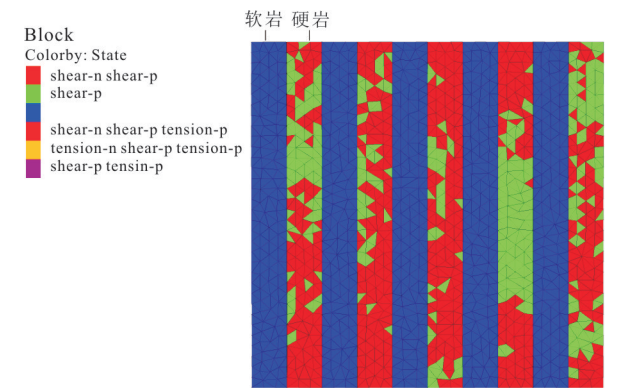


图8 单轴压缩条件下巴东组软硬互层岩体(90°倾角)
Fig. 8 Distribution of plastic failure zone of soft and hard interbedded rock masses in Badong Formation under uniaxial compression($\beta=90^\circ$)
塑性破坏区分布图

体结构仅考虑岩层层面、岩体强度仅考虑单轴压缩强度.考虑复杂结构面几何分布的情况及软硬互层岩体其他强度参数劣化特征,有待进一步研究.

(2)本研 究所得到的软硬互层岩体单轴压缩强度劣化影响分区是在考虑特定岩性组合的基础上得出的,虽然分区界限仅适用于巴东组第二段粉砂质泥岩与砂岩互层岩体,但划分的4个区间是对不同类型的软硬互层岩体普遍适用的.具

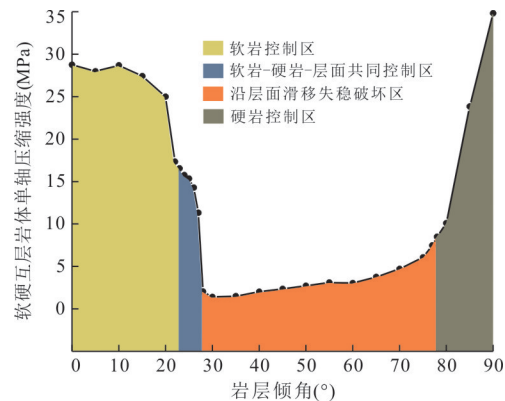


图9 巴东组软硬互层岩体强度劣化主控因素(岩石/结构面劣化)与岩层倾角的关系分区
Fig. 9 Zoning diagram of the relationship between the main controlling factors (rock/discontinuity degradation) of strength deterioration and the dip angles of soft and hard interbedded rock masses in Badong Formation

体分区界限受岩性组合、应力水平等因素影响,后续将开展进一步研究.

4 结论

本文以巴东组第二段红色系列的砂岩与粉砂质泥岩互层岩组为研究对象,开展了岩石/结构面

表2 不同岩层倾角条件下软岩/硬岩/层面劣化对巴东组软硬互层岩体强度劣化的贡献度

Table 2 The contribution of soft rock/hard rock/bedding plane degradation to the strength degradation of soft and hard interbedded rock masses in the Badong Formation under different dip angles

	岩层倾角(°)	干湿循环15次后岩体强度劣化率 d (%)	岩石/层面劣化对岩体强度劣化的贡献度		
			软岩贡献度 C_s (%)	硬岩贡献度 C_h (%)	层面贡献度 C_d (%)
软岩控制区	0	88.11	56.06	43.78	0.17
	10	90.31	56.91	42.95	0.14
	20	85.57	60.11	39.19	0.70
	22	83.46	65.05	34.95	0.00
软岩—硬岩—层面共同控制区	23	84.24	53.88	36.40	9.72
	24	84.64	50.60	23.52	25.88
	25	84.39	53.16	17.08	29.75
	26	80.93	42.10	22.65	35.25
	27	80.53	42.38	19.14	38.47
沿层面滑移失稳破坏区	28	0.00	/	/	/
	77	13.41	/	/	/
硬岩控制区	78	26.99	0.26	97.83	1.92
	80	33.00	0.42	96.73	2.85
	85	66.75	0.45	99.21	0.34
	90	75.17	25.64	74.07	0.29

注:“/”代表该区间岩体单轴压缩强度劣化可忽略不计,故无需计算软岩/硬岩/层面劣化贡献度.

劣化导致巴东组软硬互层岩体强度劣化的作用机制研究,结果表明:

(1)不同岩层倾角条件下,软岩/硬岩/层面劣化对巴东组软硬互层岩体单轴压缩强度劣化的影响有明显区别.当岩层倾角较小时,岩体的破坏模式为穿切岩石和层面的复合破坏,故岩体的强度主要由软岩的强度控制;当岩层倾角接近但小于岩层面基本摩擦角时,随着干湿循环次数的增加,岩体的破坏模式由沿软岩的剪切破坏转为沿层面的剪切滑移破坏,岩体强度劣化由软岩劣化控制转为由层面劣化控制;当岩层倾角较大时,岩体的破坏模式主要为沿硬岩的劈裂破坏,岩体的强度劣化由硬岩劣化控制.

(2)以软岩/硬岩/层面劣化对巴东组软硬互层岩体单轴压缩强度劣化的贡献度为依据,将岩层倾角全范围划分为软岩控制区($0^\circ \leq \beta < 23^\circ$)、软岩—硬岩—层面共同控制区($23^\circ \leq \beta < 28^\circ$)、沿层面滑移失稳破坏区($28^\circ \leq \beta < 78^\circ$)和硬岩控制区($78^\circ \leq \beta \leq 90^\circ$),揭示了巴东组软硬互层岩体强度劣化的主控因素(岩石/结构面劣化)及其受岩层倾角的影响,可为科学确定库岸消落带巴东组岩体强度参数提供理论依据.

References

- Chen, Y.L., Zhang, Y.N., Li, K.B., et al., 2017. Distinct Element Numerical Analysis of Failure Process of Interlayered Rock Subjected to Uniaxial Compression. *Journal of Mining and Safety Engineering*, 34(4): 795—802, 816 (in Chinese with English abstract).
- Deng, H.F., Zhou, M.L., Li, J.L., et al., 2016. Mechanical Properties Deteriorating Change Rule Research of Red-Layer Soft Rock under Water-Rock Interaction. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 35(Suppl.2): 3481—3491 (in Chinese with English abstract).
- Deng, Q.L., Zhu, Z.Y., Cui, Z.Q., et al., 2000. Mass Rock Creep and Landsliding on the Huangtupo Slope in the Reservoir Area of the Three Gorges Project, Yangtze River, China. *Engineering Geology*, 58(1): 67—83. [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(00\)00053-3](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(00)00053-3)
- Diao, X.H., Fang, X.T., Yang, C.X., 1999. Key Problems in Numerical Simulation Application in Rock Engineering and Its Development. *Metal Mine*, (6): 5—7 (in Chinese with English abstract).
- Fang, K., Wu, Q., Wang, J., et al., 2014. Research on Shear Characteristics and the Evolution Mechanism of Bedding Planes between Two Different Rock Types Based on Particle Flow Code. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 31(11): 31—37 (in Chinese with English abstract).
- Fu, Y., Wang, Z.J., Liu, X.R., et al., 2017. Meso Damage Evolution Characteristics and Macro Degradation of Sandstone under Wetting-Drying Cycles. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 39(9): 1653—1661 (in Chinese with English abstract).
- Jia, C.G., Chen, J.H., Guo, Y.T., et al., 2013. Research on Mechanical Behaviors and Failure Modes of Layer Shale. *Rock and Soil Mechanics*, 34(Suppl. 2): 57—61 (in Chinese with English abstract).
- Jian, W.X., Li, S.J., Tao, L., 2015. Deterioration Mechanism of Shear Strength of Badong Formation Soft Rocks in the Hydro-Fluctuation Belt of Three Gorges Reservoir. *Geological Science and Technology Information*, 34(4): 170—175 (in Chinese with English abstract).
- Jian, W.X., Yin, K.L., Ma, C.Q., et al., 2005. Characteristics of Incompetent Beds in Jurassic Red Clastic Rocks in Wanzhou. *Rock and Soil Mechanics*, 26(6): 901—905, 914 (in Chinese with English abstract).
- Li, A., Shao, G.J., Fan, H.L., et al., 2014. Investigation of Mechanical Properties of Soft and Hard Interbedded Composite Rock Mass Based on Meso-Level Heterogeneity. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 33(Suppl. 1): 3042—3049 (in Chinese with English abstract).
- Li, H.L., Yi, S.H., Deng, Q.L., 2006. Development Characteristics and Their Spatial Variations of Badong Formation in the Three Gorges Reservoir Region. *Journal of Engineering Geology*, 14(5): 577—581 (in Chinese with English abstract).
- Li, S.D., Li, X., Zhang, N.X., et al., 2004. Sedimentation Characteristics of the Jurassic Sliding Prone Stratum in the Three Gorges Reservoir Area and Their Influence on Physical and Mechanical Properties of Rock. *Journal of Engineering Geology*, 12(4): 385—389 (in Chinese with English abstract).
- Liang, Z.Z., Tang, C.A., Li, H.X., et al., 2005. A Numerical Study on Failure Process of Transversely Isotropic Rock Subjected to Uniaxial Compression. *Rock and Soil Mechanics*, 26(1): 57—62 (in Chinese with English abstract).
- Liu, X.R., Wang, Z.J., Fu, Y., et al., 2017. Strength and Failure Criterion of Argillaceous Sandstone under Dry-Wet Cycles. *Rock and Soil Mechanics*, 38(12): 3395—3401 (in Chinese with English abstract).
- Shen, P.W., Tang, H.M., Wang, D.J., et al., 2017. Disinte-

- gration Characteristics of Red-Bed Mudstone of Badong Formation under Wet-Dry Cycles. *Rock and Soil Mechanics*, 38(7): 1990—1998 (in Chinese with English abstract).
- Tang, H.M., Ma, S.Z., Liu, Y.R., et al., 2002. Stability and Control Measures of Zhaoshuling Landslide, Badong County, Three Gorges Reservoir. *Earth Science*, 27(5): 621—625 (in Chinese with English abstract).
- Tang, H.M., Wasowski, J., Juang, C.H., 2019. Geohazards in the Three Gorges Reservoir Area, China: Lessons Learned from Decades of Research. *Engineering Geology*, 261: 1—15. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2019.105267>
- Teng, W.F., Wu, Y.P., Yang, D.Y., 2005. Landslide Stability and Control Method of Xirangpozi Landslide in Badong County. *Geological Science and Technology Information*, 24(Suppl.): 142—144 (in Chinese with English abstract).
- Tien, Y.M., Kuo, M.C., 2001. A Failure Criterion for Transversely Isotropic Rocks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 38(3): 399—412. [https://doi.org/10.1016/S1365-1609\(01\)00007-7](https://doi.org/10.1016/S1365-1609(01)00007-7)
- Tien, Y.M., Kuo, M.C., Juang, C.H., 2006. An Experimental Investigation of the Failure Mechanism of Simulated Transversely Isotropic Rocks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 43(8): 1163—1181. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2006.03.011>
- Wu, Q., Xu, Y.J., Tang, H.M., et al., 2018. Investigation on the Shear Properties of Discontinuities at the Interface between Different Rock Types in the Badong Formation, China. *Engineering Geology*, 245: 280—291. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2018.09.002>
- Wu, Q., Xu, Y.J., Tang, H.M., et al., 2019. Peak Shear Strength Prediction for Discontinuities between Two Different Rock Types Using Neural Network Approach. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 78(4): 2315—2329. <https://doi.org/10.1007/s10064-018-1290-x>
- Wu, Y.P., Yu, H.M., Hu, Y.X., 2006. Research on Engineering Geological Characters of Aubergine Mudstone of Badong New City Zone. *Rock and Soil Mechanics*, 27(7): 1201—1203, 1208 (in Chinese with English abstract).
- Xiang, F.F., Wang, L.C., Yao, R., et al., 2018. The Characteristics of Climate Change and Response of Vegetation in Three Gorges Reservoir Area. *Earth Science*, 43(Suppl.1): 42—52 (in Chinese with English abstract).
- Yan, T.Z., 1994. Hydro-Engineering Geology and Environment Protection. China University of Geosciences Press, Wuhan (in Chinese).
- Yao, C., Li, Y., Jiang, Q.H., et al., 2015. Mesoscopic Model of Failure Process of Interlayered Rock under Compression. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 34(8): 1542—1551 (in Chinese with English abstract).
- Yin, Y.P., Hu, R.L., 2004. Engineering Geological Characteristics of Purplish-Red Mudstone of Middle Tertiary Formation at the Three Gorges Reservoir. *Journal of Engineering Geology*, 12(2): 124—135 (in Chinese with English abstract).
- Yu, H.M., Hu, Y.X., Zhang, C.G., 2002. Research on Disintegration Characters of Red Mudstone of Xirangpo in Badong Area of the Reservoir of Three Gorges Project. *Geological Science and Technology Information*, 21(4): 77—80 (in Chinese with English abstract).
- Zeng, S., Li, Z.C., Wei, H., et al., 2013. Stability Analysis of Red Sand Stone Bedding Slope under Rainfall Infiltration and Dry-Wet Cycling. *Rock and Soil Mechanics*, 34(6): 1536—1540, 1559 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, G.M., Li, Y.P., Yang, C.L., et al., 2012. Physical Simulation of Deformation and Failure Mechanism of Soft and Hard Interbedded Salt Rocks. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 31(9): 1813—1820 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, J.Y., Wan, L.P., Pan, H.Y., et al., 2017. Long-Term Stability of Bank Slope Considering Characteristics of Water-Rock Interaction. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 39(10): 1851—1858 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Z.H., Huang, X., Cui, Q., 2017. Experimental Study on Deterioration of the Tensile Strength of Red Sandstone during the Operation of Reservoir. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 36(11): 2731—2740 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 陈宇龙, 张宇宁, 李科斌, 等, 2017. 单轴压缩下软硬互层岩石破裂过程的离散元数值分析. 采矿与安全工程学报, 34(4): 795—802, 816.
- 邓华锋, 周美玲, 李建林, 等, 2016. 水—岩作用下红层软岩力学特性劣化规律研究. 岩石力学与工程学报, 35(增刊2): 3481—3491.
- 刁心宏, 冯夏庭, 杨成祥, 1999. 岩石工程中数值模拟的关键问题及其发展. 金属矿山, (6): 5—7.
- 方堃, 吴琼, 王姣, 等, 2014. 基于颗粒流异性层面剪切特性及演化机理研究. 长江科学院院报, 31(11): 31—37.
- 傅晏, 王子娟, 刘新荣, 等, 2017. 干湿循环作用下砂岩微观损伤演化及宏观劣化研究. 岩土工程学报, 39(9): 1653—1661.
- 贾长贵, 陈军海, 郭印同, 等, 2013. 层状页岩力学特性及其

- 破坏模式研究. 岩土力学, 34(增刊 2): 57—61.
- 简文星, 李世金, 陶良, 2015. 三峡库区消落带巴东组软岩抗剪强度劣化机理. 地质科技情报, 34(4): 170—175.
- 简文星, 殷坤龙, 马昌前, 等, 2005. 万州侏罗纪红层软弱夹层特征. 岩土力学, 26(6): 901—905, 914.
- 李昂, 邵国建, 范华林, 等, 2014. 基于细观层次的软硬互层状复合岩体力学特性研究. 岩石力学与工程学报, 33(增刊 1): 3042—3049.
- 李华亮, 易顺华, 邓清禄, 2006. 三峡库区巴东组地层的发育特征及其空间变化规律. 工程地质学报, 14(5): 577—581.
- 李守定, 李晓, 张年学, 等, 2004. 三峡库区侏罗系易滑地层沉积特征及其对岩石物理力学性质的影响. 工程地质学报, 12(4): 385—389.
- 梁正召, 唐春安, 李厚祥, 等, 2005. 单轴压缩下横观各向同性岩石破裂过程的数值模拟. 岩土力学, 26(1): 57—62.
- 刘新荣, 王子娟, 傅晏, 等, 2017. 考虑干湿循环作用泥质砂岩的强度与破坏准则研究. 岩土力学, 38(12): 3395—3401.
- 申培武, 唐辉明, 汪丁建, 等, 2017. 巴东组紫红色泥岩干湿循环崩解特征试验研究. 岩土力学, 38(7): 1990—1998.
- 唐辉明, 马淑芝, 刘佑荣, 等, 2002. 三峡工程库区巴东县赵树岭滑坡稳定性与防治对策研究. 地球科学, 27(5): 621—625.
- 滕伟福, 吴益平, 杨冬英, 2005. 巴东县西壤坡西滑坡稳定性分析与防治对策研究. 地质科技情报, 24(增刊): 142—144.
- 吴益平, 余宏明, 胡艳新, 2006. 巴东新城区紫红色泥岩工程地质性质研究. 岩土力学, 27(7): 1201—1203, 1208.
- 向菲菲, 王伦澈, 姚瑞, 等, 2018. 三峡库区气候变化特征及其植被响应. 地球科学, 43(S1): 42—52.
- 晏同珍, 1994. 水文工程地质与环境保护. 武汉: 中国地质大学出版社.
- 姚池, 李姚, 姜清辉, 等, 2015. 应力作用下软硬互层岩石破裂过程的细观模拟. 岩石力学与工程学报, 34(8): 1542—1551.
- 殷跃平, 胡瑞林, 2004. 三峡库区巴东组(T_2b)紫红色泥岩工程地质特征研究. 工程地质学报, 12(2): 124—135.
- 余宏明, 胡艳欣, 张纯根, 2002. 三峡库区巴东地区紫红色泥岩的崩解特性研究. 地质科技情报, 21(4): 77—80.
- 曾胜, 李振存, 韦慧, 等, 2013. 降雨渗流及干湿循环作用下红砂岩顺层边坡稳定性分析. 岩土力学, 34(6): 1536—1540, 1559.
- 张桂民, 李银平, 杨长来, 等, 2012. 软硬互层盐岩变形破坏物理模拟试验研究. 岩石力学与工程学报, 31(9): 1813—1820.
- 张景昱, 宛良朋, 潘洪月, 等, 2017. 考虑水—岩作用特点的典型岸坡长期稳定性分析. 岩土工程学报, 39(10): 1851—1858.
- 张振华, 黄翔, 崔强, 2017. 水库运行期岸坡消落带红砂岩抗拉强度劣化机制. 岩石力学与工程学报, 36(11): 2731—2740.