

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2018.06.010

软硬互层状岩体的室内单轴压缩试验及数值模拟

李 昂¹, 邵国建², 苏静波¹, 刘君成³, 孙 阳¹

(1. 河海大学港口海岸与近海工程学院, 江苏 南京 210098;
2. 河海大学力学与材料学院, 江苏 南京 210098; 3. 国网新源控股有限公司技术中心, 北京 100161)

摘要: 以锦屏软硬互层状岩体为研究对象, 基于室内试验分析单轴应力状态下岩样的3种破坏模式并结合数值模拟方法, 分别探讨层面倾角、软弱夹层数量、分布及所占体积比等因素对互层状岩体变形特性、强度特征及破坏机制的影响。研究表明: 锦屏互层状岩体的破坏总体遵循单轴压缩破坏的多裂纹劈裂模式, 且在缓层面倾角范围内岩体的破坏以岩质材料自身属性为控制, 而在较大倾角水平上则以层理弱面的影响为主导因素; 软弱夹层数量对于层状岩体的U形强度规律影响不显著, 但随着软弱夹层数量的增加, 破坏荷载极小值有向层面倾角较小方向前移的趋势; 随着软弱夹层所占体积比的增加, 破坏荷载总体呈现下降趋势; 当软弱夹层所占体积比接近时, 软弱夹层数量的增加对岩样破坏荷载下降的影响与岩层倾角大小具有正相关关系, 且当岩层水平时, 对强度基本不发生影响。

关键词: 软硬互层状岩体; 软弱夹层; 单轴压缩试验; 数值模拟; 锦屏水利枢纽工程

中图分类号: TU122 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2018)06-0533-06

Uniaxial compression test and numerical simulation for alternatively soft and hard interbedded rock mass

LI Ang¹, SHAO Guojian², SU Jingbo¹, LIU Juncheng³, SUN Yang¹

(1. College of Harbour, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. College of Mechanics and Materials, Hohai University Nanjing 210098, China;
3. State Grid Xin Yuan Company Ltd. Technology Center, Beijing 100161, China)

Abstract: For the alternatively soft and hard interbedded rock mass of JinPing Hydro-Junction project, three failure modes of rock samples under uniaxial compression stress are analyzed based on laboratory experiments, and the influence of dip angle, quantity, distribution and volume ratio of weak intercalations on the deformation property, strength characteristics and failure mechanism of rock mass are discussed by the numerical simulation. The results show that the failure of soft and hard interbedded rock mass of JinPing follows the multi-crack splitting mode of uniaxial compression failure. For the case of gentle dip angle, the failure of layered rock mass is controlled by the property of rock mass itself, while for the case of large dip angle, the influence of weak intercalations is the dominant factor. Besides, the number of weak intercalations has no significant effect on the "U" type strength characteristics of layered rock mass, but with the increase of weak intercalations, minimum value of failure load tends to move forward. With the increase of the volume ratio of the weak intercalation, the failure loading totally shows a downward trend, and when the volume ratio of weak intercalation is close in rock samples, the effect of increasing weak intercalation on the decrease of failure load is positively related to the dip angle of weak intercalations. At last, it can also be found that the increase of weak intercalations has no effect on the strength if the rock layer is horizontal.

Key words: alternatively soft and hard interbedded rock mass; weak intercalation; uniaxial compression test; numerical simulation; Hydro-Junction project of Jinping

基金项目: 国家自然科学基金面上基金(41672257, 51679081); 中央高校基本科研业务费(2016B00614)

作者简介: 李昂(1986—), 男, 讲师, 博士, 主要从事岩石力学与工程方面的研究。E-mail: liang2008@hhu.edu.cn

通信作者: 邵国建, 教授。E-mail: gjshao@hhu.edu.cn

引用本文: 李昂, 邵国建, 苏静波, 等. 软硬互层状岩体的室内单轴压缩试验及数值模拟[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2018, 46(6): 533-538.
LI Ang, SHAO Guojian, SU Jingbo, et al. Uniaxial compression test and numerical simulation for alternatively soft and hard interbedded rock mass[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2018, 46(6): 533-538.

层状岩体作为一种力学性质特殊的岩体,广泛存在于自然界中。从岩体结构力学角度,根据具体结构形式的差异,王思敬等^[1]将层状岩体结构细分为互层结构、夹层结构和薄层结构3种类型。其中,由于软硬互层状岩体既具有层状岩体变形横观各向同性及强度各向异性的特征,同时又受到岩体软、硬组分的影响,力学性质十分复杂,引起了学者们的关注。

国内外对于层状岩体的研究大都基于均匀化、模式化的传统层状结构模型。同时,研究方向则主要集中在不同围压下层间倾角、层间组合方式等因素对层状岩体强度、变形特性及破坏规律的影响。如,陈志坚等^[2]对层状岩体的岩性组合特征,软弱夹层、裂隙的分布规律以及岩体结构特征进行分析、研究、分区分类并建立相应的样本单元,提出了用数值分析方法模拟现场大型试验的“样本单元法”;刘新荣等^[3]基于层状岩体的渐进破坏过程,从复合材料力学角度研究了岩样初始弹性模量、切线弹性模量、割线弹性模量、泊松比等弹性参量的变化规律;Tien 等^[4-5]借助先进的三维重建技术对试验过程中层状相似材料试件的破坏过程及破坏特征进行了分析,并对不同层面倾角及围压下的破坏模式进行了归纳,提出了 Tien-Kuo 破坏准则;黄书岭等^[6]借助复合材料理论的思想,通过分别考虑基岩及层面的力学特性,并结合横观各向同性理论和应变硬化-软化理论,发展了层状岩体复合材料模型;Wang 等^[7]采用弹性力学与广义塑性力学理论建立了岩石横观各向同性弹塑性本构模型并提出了模型参数的求解方法。目前,已有部分学者在开展研究工作时开始考虑软硬互层状岩体的特殊结构形式,如熊良宵等^[8]研究了软硬互层状岩体中软弱夹层的厚度及含水量对岩体长期强度的影响。赵小平等^[9]利用扫描电镜高温疲劳试验系统分析了互层状大理岩不同层理方向的细观断裂机制及其与特征参数间的关系。李昂等^[10-11]以区域生长算法提取软硬互层状岩样的细观结构信息,从细观力学的角度研究了非均匀特性对岩体力学特性的影响。但总体而言,关于岩体不同组构材料的分布形态、含量等因素对于软硬互层状岩体力学特性的影响依然欠缺。

笔者在前人研究基础上,首先以室内压缩试验研究软硬互层状岩体层面倾角与强度的相关性;进而建立弹-脆-塑性的应变软化模型,以比例关系映射方法生成均匀化计算网格;采用数值模拟方案,研究不同层面倾角下,软弱夹层数量、分布及所占体积比等因素对软硬互层状岩体的变形特性、强度特征及破坏规律的影响。

1 软硬互层状岩体的室内单轴压缩试验

试验原岩取自锦屏水利枢纽工程地下厂房区三叠系中上统杂谷脑组岩层,为灰白色细晶大理岩与绿片岩软硬互层状岩体。其中,大理岩组分相对坚硬,中细粒结构,主要矿物成分为方解石、白云石;绿片岩组分则相对较软,主要矿物成分为方解石、绿泥石片岩等,且以片理发育、较疏松为特征,是软弱结构面的典型代表。按照相关规范^[12],将互层状原岩加工为若干 50 mm×50 mm×50 mm 的立方体岩样。选取层理特征较明显的岩样 S-C-01、S-C-02、S-C-03,于 WAW-E2000 型电液伺服万能试验机上进行单轴压缩破坏试验。为了保证试验的顺利进行,试验过程中首先对岩样施加 0.5 kN 的预压荷载,如图 1(a)~(c)所示,岩样的最终破坏

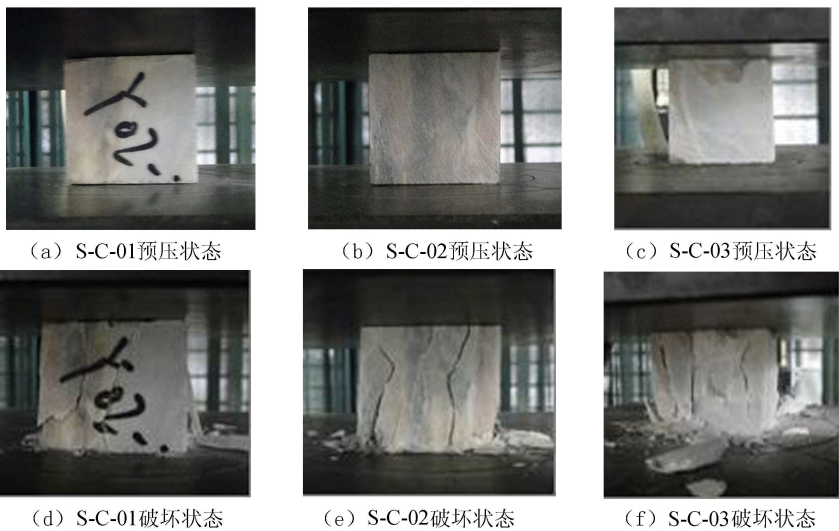


图1 典型岩样压缩试验前后对比

Fig.1 Comparison of typical samples before and after compression tests

形态如图 1(d) ~ (f) 所示。

由图 1 可见,岩样 S-C-01 由绿片岩与大理岩左右简单“拼接”而成且其层面倾角(加载向与软弱层面夹角) α 为 0° 。当轴向荷载达到 191.2 kN 时,岩样破坏,脆性较显著。最终的破坏主裂纹出现在各岩层内部靠近软硬层面交界处,并与加载方向呈一定的角度。

岩样 S-C-02 在左侧、中部和右侧均分布有绿片岩“条带区”,其中左侧及中部条带区较厚与加载向夹角为 0° 且中部条带区呈贯通趋势。相比而言,右侧条带较薄且与加载向呈一定角度。当轴向荷载达到 143.3 kN 时,岩样破坏。荷载-应变曲线形态与岩样 S-C-01 相近,破坏荷载相对滞后。其破坏模式存在有绿片岩左侧和中部条带区的贯通性破坏及由右侧薄层区扩展而来的主裂纹破坏,且右侧主裂纹的扩展趋势与绿片岩薄层区的分布关联性较高。

岩样 S-C-03 中绿片岩主要存在于左侧及上部区域,分布相对集中。当荷载达到 339.7 kN 时,左侧与加载向呈一定倾角的层理弱面出现了贯通性主裂纹破坏,而上部与加载向呈 90° 倾角的绿片岩区域内部则出现了多条沿加载方向的裂纹。由于两组绿片岩层均位于岩样边缘,大理岩相对集中,岩样保持了典型的单轴压缩多裂纹劈裂的传统破坏形式。

综合各岩样的试验结果,认为锦屏互层状岩体的破坏总体遵循岩体单轴压缩破坏的多裂纹劈裂模式。具体破坏机制与 Jaeger 等^[4, 13-14] 所发展的单一弱面理论较吻合,即在缓层面倾角范围内($\alpha < 30^\circ$) 层状岩体的破坏以岩体材料自身属性为控制而在较大倾角范围内($30^\circ \leq \alpha \leq 60^\circ$) 则以层理弱面的影响为主导因素。

2 数值模拟

2.1 数值模拟方案及计算网格的生成

为了进一步研究层面倾角,绿片岩软弱夹层数量、分布及所占体积比等因素对岩样变形特性及强度特征的影响,采用数值模拟的方法对 4 组(S-1-N、S-1-W、S-2、S-3) 岩样进行单轴压缩对比试验。每组岩样均分别设层面倾角为 0° 、 15° 、 30° 、 45° 、 60° 、 75° 、 90° 。岩样编号规则:S-45-1-N 代表 S-1-N 组,层面倾角为 45° 。试件尺寸为 $50\text{ mm} \times 50\text{ mm} \times 50\text{ mm}$,层面倾角为 α 时的岩样组如图 2 所示。由图 2 可见,岩样 S- α -1-N、S- α -2、S- α -3 的软弱夹层数量呈逐次增加的趋势,且在软弱夹层数量相同的情况下,岩样 S- α -1-W 的绿片岩组分含量高于岩样 S- α -1-N,各组岩样具体的软弱夹层数量及组分含量见表 1。数值网格方面,以比例关系映射方法建立软硬互层状岩样的均匀化计算网格。其中网格规模为 $50\text{ mm} \times 50\text{ mm}$,单元尺度为 $0.5\text{ mm} \times 0.5\text{ mm}$,共划分为 10 000 个单元。

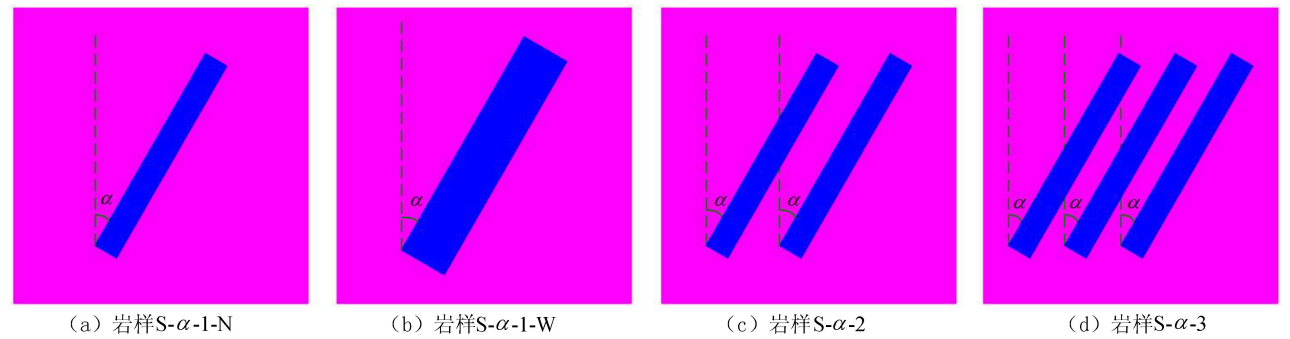


图 2 软弱层面倾角为 α 的岩样组示意图

Fig. 2 Sketch map of rock sample group with weak intercalation of incline angle α

2.2 计算模型的建立

整个数值计算过程采用基于应变软化的弹-脆-塑性本构进行,以带有拉伸截止限的 Mohr-Coulomb 屈服准则作为单元劣化起始点的判据,引入与材料塑性剪切应变和塑性拉伸应变密切相关的塑性参量 κ_s 和 κ_t ,并将材料强度参数表示为两者函数的形式,来描述其塑性剪切软化行为和塑性拉伸软化行为。其中, κ_s 、 κ_t 的增量型数学表达式为

表 1 各试验组中绿片岩夹层信息		
Table 1 Information of greenschist intercalation in each test group		
实验组别	绿片岩 夹层数	绿片岩夹层 所占体积比/%
S-1-N	1	6.37
S-1-W	1	14.22
S-2	2	12.73
S-3	3	19.10

$$\Delta\kappa_s=\sqrt{\frac{(\Delta\varepsilon_1^{ps}-\Delta\varepsilon_m^{ps})^2+(\Delta\varepsilon_m^{ps})^2+(\Delta\varepsilon_3^{ps}-\Delta\varepsilon_m^{ps})^2}{2}}\qquad\Delta\kappa_t=\Delta\varepsilon_3^{pt}\qquad(1)$$

其中

$$\Delta\varepsilon_m^{ps}=\frac{\Delta\varepsilon_1^{ps}+\Delta\varepsilon_3^{ps}}{3}$$

式中: $\Delta\varepsilon_1^{ps}$ 、 $\Delta\varepsilon_3^{ps}$ ——材料的第一主应力、第三主应力方向的塑性剪切应变增量; $\Delta\varepsilon_3^{pt}$ ——材料的塑性拉应变增量。

图3给出了单轴应力状态下,本文所采用的弹-脆-塑性本构关系。图3中, σ_{t0} 与 σ_{tr} 分别为单元的抗拉强度与残余抗拉强度; ε_{tu}^e 为单元满足抗拉强度准则时弹性极限所对应的拉伸应变,其是塑性拉伸应变 ε_3^{pt} 的起始点,也是拉伸应变软化的临界点; σ_{c0} 与 σ_{cr} 分别定义为单元的抗压强度及残余抗压强度。反映在Mohr-Coulomb准则中,可定义 c_0 与 c_r 分别为初始黏聚力及残余黏聚力, φ_0 与 φ_r 分别为初始内摩擦角及残余内摩擦角; ε_{cu}^e 为单元满足Mohr-Coulomb准则时弹性极限所对应的剪切应变,其是塑性剪切应变 ε_1^{ps} 的起始点,也是剪切应变软化的临界点。此外,模型还采用 λ_t 、 λ_s 、 λ_{sc} 、 λ_{sq} 来定义了残余抗拉强度系数、残余抗剪强度系数、残余黏聚力系数及残余内摩擦角系数。

参考文献[15-17]给出了锦屏互层状岩体的相关力学参数见表2。由于脆性硬质类岩体的内摩擦角通常在破坏前后变化不大^[18],在计算过程中未考虑内摩擦角的影响。

2.3 结果分析

2.3.1 强度特征

图4为试验组S-1-N、S-1-W、S-2、S-3所对应破坏荷载随层面倾角的变化规律。由图4可见,4组试验中岩样强度各向异性显著,且破坏荷载-层面倾角关系曲线整体均呈现出似抛物线的凹型曲线形式,与Hudson^[19]总结的层状岩体U形强度规律相一致。且在软弱夹层数量相同的情况下,绿片岩所占体积百分比比较大的试验组S-1-W相较于试验组S-1-N,其破坏荷载-层面倾角曲线更加平缓,拐点不明显;强度极值方面,4组试验的破坏荷载最小极值均出现在30°~60°之间,与Tian等^[4]、冒海军等^[20]的研究成果具有相似性,即在缓倾角阶段层状岩体的强度较高,破坏一般不受层面倾角的影响。但随着倾角的增大岩体强度逐渐降低,倾向于在倾角中间水平出现最低值。同时,通过对比可发现,随着软弱夹层数量的增加,该极值的出现有前移的趋势即当软弱夹层数量为2和3时,破坏荷载最小值由软弱夹层数量为1时的45°前移到了30°附近。

图5为不同倾角岩样在特定软弱夹层分布情况下破坏荷载-绿片岩所占体积比关系曲线。可以发现,在不同倾角试验组中,随着绿片岩所占体积比的增加破坏荷载虽然在个别情况下出现一定程度的波动,但总体呈现出下降的趋势。当绿片岩所占体积比接近时,软弱夹层数量的增加对岩样破坏荷载下降的影响与层

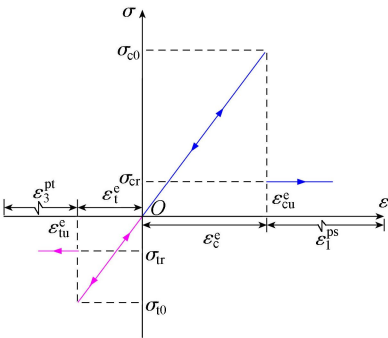


图3 单轴受载时的弹-脆-塑性本构关系
Fig.3 Elasto-brittle-plastic constitutive relationship under uniaxial loading

表2 锦屏互层状岩体相关材料参数取值

Table 2 Parameters of interbedded rock mass in Jinping

岩体材料	弹性模量/ GPa	泊松比	黏聚力/ MPa	内摩擦角/ (°)	抗拉强度/ MPa
大理岩	50	0.22	45	50	2
绿片岩	11	0.25	10	37	1

注:λ_t、λ_{sc}取为0.1。

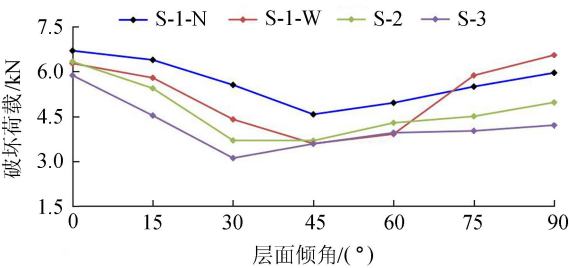


图4 破坏荷载-层面倾角关系
Fig.4 Relationship between failure loading and plane inclination

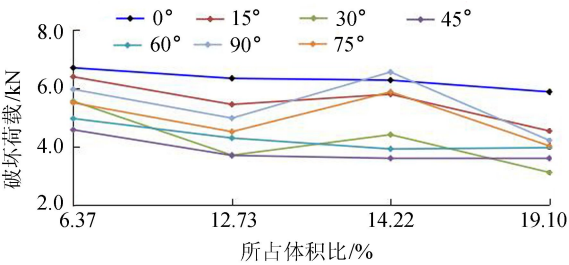


图5 破坏荷载-绿片岩所占体积比关系
Fig.5 Relationship between failure loading and volume rate of greenschist

面倾角大小具有正相关关系。此外值得一提的是,在软弱夹层数为 1 时,在中高水平层面倾角范围内绿片岩组分含量对于破坏荷载的影响较大。

2.3.2 变形特性与破坏机制

由图 6 可见,在加载初期各试验组曲线弹性阶段的斜率随着层面倾角的改变而发生变化,且变化趋势与岩样破坏荷载随层面倾角的变化一致,即曲线弹性阶段的斜率也出现了由大到小进而增大的似抛物线变化规律。从本质上而言,岩样荷载-应变曲线弹性阶段的斜率即是其宏观刚度的体现,产生上述现象的原因可归结为岩质材料自身力学属性与层面倾向对岩体力学特性的控制性作用。岩体结构控制论认为,任何地质体的宏观力学行为特征都是其细观组构及其他多种因素共同作用的结构。针对软硬互层状岩体,软、硬 2 种岩质材料的组构方式及软弱夹层的倾向是影响岩样力学特性的主要因素且细观组构通常意义上可理解为岩质材料自身力学属性,这与岩体单一弱面理论中关于破坏强度的描述是一致的;随着加载过程的继续,岩样逐渐出现破坏,或沿结构面滑动,或穿切结构面和岩质材料发生破坏,直至产生的抗力达到最大值即破坏荷载;当达到破坏荷载后,发生沿结构面或岩石内部的滑动破坏。此时,随着剪切错动,出现摩擦剪胀现象,表现出一定的延性。对于破坏荷载极值点及其附近荷载区域所对应的岩样所表现出的延性更为明显;峰值后,岩样即进入残余强度阶段。

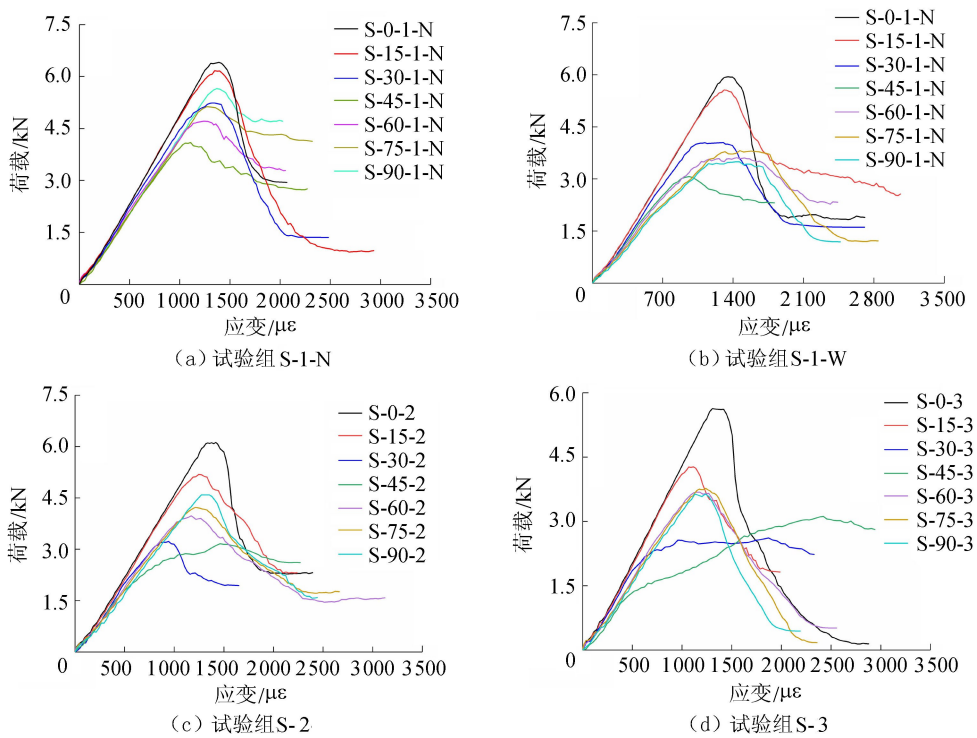


图 6 荷载-应变关系
Fig. 6 Relationship between loading and strain

3 结 语

- a. 通过开展室内试验,认为锦屏互层状岩体的破坏总体遵循岩体单轴压缩破坏的多裂纹劈裂模式,且在缓层面倾角范围内($\alpha < 30^\circ$)岩体的破坏以岩质材料自身属性为控制而在较大倾角范围内($30^\circ \leq \alpha \leq 60^\circ$)则以层理弱面的影响为主导因素。
- b. 以数值手段考察岩样破坏荷载与层面倾角的关系,发现软弱夹层数量对于层状岩体的 U 形强度规律影响不显著。但随着软弱夹层数量的增加,破坏荷载极值的出现有向层面倾角较小方向前移的趋势。此外,在加载初期,各试验组荷载-应变曲线斜率随着层面倾角的改变而发生了变化,且变化趋势与岩样破坏荷载随层面倾角的似抛物线变化规律相一致。
- c. 采用数值试验考察破坏荷载与绿片岩所占体积比的关系,得到随着绿片岩所占体积比的增加破坏荷载总体呈现下降趋势的结论。且当绿片岩所占体积比接近时,软弱夹层数量的增加对岩样破坏荷载下降的

影响与岩层倾角大小基本呈正相关关系。

以上工作均是建立在均匀化、理想化的层状岩体力学模型之上,通过对岩体中不同介质进行“分离,集中”并赋予不同相关材料参数的方式来开展软硬互层状岩体力学行为特征的研究。而自然界中的层状岩体的组构形式往往是极为复杂的,其具有不连续、非均匀及各向异性的特点,如何建立更加符合工程实际的互层状岩体力学模型将是下一步工作的重点。

参考文献:

- [1] 王思敬,黄鼎成. 工程地质世纪成就[M]. 北京:地质出版社,2004.
- [2] 陈志坚,卓家寿. 样本单元法及层状含裂隙岩体力学参数的确定[J]. 河海大学学报(自然科学版),2000,28(1):16-19. (CHEN Zhijian, ZHUO Jiashou. Application of “sample element method” to determination of mechanical parameters of stratified crack rock mass[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2000,28(1):16-19. (in Chinese))
- [3] 刘新荣,余海龙,姜德义,等. 岩盐顶板复合岩石力学性质试验研究[J]. 重庆建筑大学学报,2004,26(3):32-35. (LIU Xinrong, YU Hailong, JIANG Deyi, et al. Experimental study of compound rock behavior at rock salt over-layer[J]. Journal of Chongqing Jianzhu University,2004,26(3):32-35. (in Chinese))
- [4] TIEN Yongming, KUO Mingchuan. A failure criterion for transversely isotropic rocks[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences,2001,38(3):399-412.
- [5] TIEN Yongming, KUO Mingchuan, JUANG Changsen. An experimental investigation of the failure mechanism of simulated transversely isotropic rocks[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences,2006,43(8):1163-1181.
- [6] 黄书岭,徐劲松,丁秀丽,等. 考虑结构面特性的层状岩体复合材料模型与应用研究[J]. 岩石力学与工程学报,2010,29(4):743-756. (HUAN Shuling, XU Jinsong, DING Xiuli, et al. Study of layered rock mass composite model based on characteristics of structural plane and its application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2010,29(4):743-756. (in Chinese))
- [7] WANG Zhechao, ZONG Zhi, QIAO Liping, et al. Elastoplastic model for transversely isotropic rocks[J]. International Journal of Geomechanics,2018,18(2):1-15.
- [8] 熊良宵,杨林德. 互层状岩体黏弹塑性流变特性的数值分析[J]. 岩石力学与工程学报,2011,30(增刊1):2803-2809. (XIONG liangxiao, YANG linde. Numerical analysis for viscoelasto-plastic rheological property of interlayered rock mass[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2011,30(Sup1):2803-2809. (in Chinese))
- [9] 赵小平,左建平,裴建良. 锦屏层状大理岩断裂机制的细观试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2012,31(3):534-542. (ZHAO Xiaoping, ZUO Jianping, PEI Jianliang. Meso-experimental study of fracture mechanism of bedded marble in Jinping[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2012,31(3):534-542. (in Chinese))
- [10] 李昂,邵国建,范华林,等. 基于细观层次的软硬互层状复合岩体力学特性研究[J]. 岩石力学与工程学报,2014,33(增刊1):3042-3049. (LI Ang, SHAO Guojian, FAN Hualin, et al. Investigation of mechanical properties of soft and hard interbedded composite rock mass based on meso-level heterogeneity[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2014,33(Sup1):3042-3049. (in Chinese))
- [11] LI Ang, SHAO Guojian, DU Peirong, et al. Numerical studies on stratified rock failure based on digital image processing technique at mesoscale[J]. Computers, Materials & Continua,2015,45(1):17-38.
- [12] 中华人民共和国行业标准编写组. 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.
- [13] JAEGER J C. Shear failure of anisotropic rocks[J]. Geological Magazine,1960,97(1):65-72.
- [14] DUVEAU G, SHAO Jianfu. A modified single plane of weakness theory for the failure of highly stratified rocks[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences,1998,35(6):807-813.
- [15] 邓荣贵,张倬元. 锦屏水电站坝区绿片岩结构及力学特性研究[J]. 成都理工学院学报,2001,28(1):93-97. (DENG Ronggui, ZHANG Zhuoyuan. Study on the microstructure and mechanical properties of greenschist in the dam site of Jinping Hydropower Station[J]. Journal of Chengdu University of Technology,2001,28(1):93-97. (in Chinese))
- [16] 黄书岭. 高应力下脆性岩石的力学模型与工程应用研究[D]. 武汉:中国科学院研究生院(武汉岩土力学研究所),2008.
- [17] 国家电力公司成都勘测设计研究院. 雅砻江锦屏一级水电站可行性研究报告——第3篇:工程地质[R]. 成都:国家电力公司成都勘测设计研究院,2003.
- [18] 张帆,盛谦,朱泽奇,等. 三峡花岗岩峰后力学特性及应变软化模型研究[J]. 岩石力学与工程学报,2008,27(增刊1):2651-2655. (ZHANG Fan, SHENG Qian, ZHU Zeqi, et al. Study on post-peak mechanical behaviour and strain-softening model of three gorges granite[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2008,27(Sup1):2651-2655. (in Chinese))
- [19] HUDSON J A. Comprehensive rock engineering vol. 1: Fundamentals [M]. Oxford: Pergamon Press,1993.
- [20] 冒海军,杨春和. 结构面对板岩力学特性影响研究[J]. 岩石力学与工程学报,2005,24(20):53-58. (MAO Haijun, YANG Chunhe. Study on effects of discontinuities on mechanical characters of slate[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2005,24(20):53-58. (in Chinese))

(收稿日期:2018-07-27 编辑:刘晓艳)