

DOI : 10.16285/j.rsm.2016.07.009

受弯条件下薄层灰岩的力学响应行为试验研究

周扬一¹, 冯夏庭¹, 徐鼎平¹, 陈东方², 李帅军¹

(1. 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, 湖北 武汉 430071;
2. 东北大学 深部金属矿山安全开采教育部重点实验室, 辽宁 沈阳 110819)

摘 要: 鉴于薄层岩体在实际地下工程中经常发生弯折破坏, 利用三点弯曲试验对单层灰岩及含弱面灰岩试样进行抗弯性能测试, 探究岩层受弯作用时的变形及破坏特征。试验结果表明, 薄层灰岩的抗弯性能与层厚密切相关, 单宽峰值弯矩及峰值力对应的岩梁挠度随层厚变化规律基本符合材料力学理论公式计算结果。薄层灰岩弯折破裂模式呈现多样化, 既有垂直切穿层理的 I 型裂纹, 也有在弱面处发生转折并沿弱面扩展的断续裂纹, 以及与层理斜交的复合型裂纹等。理论分析表明, 薄层岩体中的裂纹扩展路径主要受层面拉、剪强度 (或断裂韧度) 与岩石抗拉强度 (或断裂韧度) 的相对大小控制。利用双模量理论结合弯曲试验求解岩石拉伸模量需要进行迭代计算, 拉压模量相差越大, 迭代次数越多, 收敛值越偏离初值。试验所得规律有助于深入理解薄层岩体弯曲变形特征及弯折破坏机制, 并可作为对薄层岩体受弯作用理论及数值计算的有益补充。

关键词: 薄层岩体; 抗弯性能; 破裂模式; 拉伸模量; 三点弯曲试验

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 7598 (2016) 07 - 1895 - 09

Experimental study of mechanical response of thin-bedded limestone under bending conditions

ZHOU Yang-yi¹, FENG Xia-ting¹, XU Ding-ping¹, CHEN Dong-fang², LI Shuai-jun¹

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China; 2. Key Laboratory of Ministry of Education on Safe Mining of Deep Metal Mines, Northeastern University, Shenyang, Liaoning 110819, China)

Abstract: Bending failures are common phenomena in thin-bedded rock mass during underground construction. In order to investigate deformation feature and failure process of rock under bending conditions, three-point bending tests were conducted on single-layer limestone samples and bedded specimens with weak planes. Our results illustrate that a close relationship exists between flexural capacity of the specimen and bed thickness, and the variations of the peak moment per width and the deflection at the peak force with specimen thickness can be reasonably predicted by the beam theory. It is shown that various fracture modes appear during testing, including mode I cracks perpendicular to bedding, zigzag cracks with changing direction at interfaces (weak planes), and oblique cracks across bedding. Theoretically, crack paths in thin-bedded rock mass are mainly controlled by the relative magnitudes of strengths (or fracture toughness) between rocks and interfaces. Tensile modulus is obtained by iteratively using the double modulus theory. Iteration process converges relatively slowly when the difference between compressive and tensile moduli is significant. These findings prove to be helpful in understanding the deformation characteristics and failure mechanisms of thin-bedded rock masses under bending conditions.

Keywords: thin-bedded rock mass; flexural behavior; fracture mode; tensile modulus; three-point bending test

1 引 言

层状岩体是一种常见的工程岩体, 岩层及分隔岩层的层面力学性质共同决定了层状岩体的宏观力

学行为。根据岩层平均厚度, 可将层状岩体划分为巨厚层、厚层、中厚层、薄层以及极薄层岩体, 平均层厚对层状岩体力学行为具有显著影响。一般认为, 随着层厚的减小, 层状岩体逐渐由各向同性介

收稿日期: 2015-04-04

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (No. 11232024); 国家自然科学基金国际合作重大项目 (No. 41320104005)。

This research was supported by the Natural Science Foundation of China through a Key Program (11232024) and an International Cooperation Major Program (41320104005).

第一作者简介: 周扬一, 男, 1987 年生, 博士研究生, 主要从事复杂条件下大型地下洞室群围岩稳定性方面的研究工作。E-mail: zhouyangyi2007@163.com

质转变为横观各向同性介质^[1]，同时由于裂纹穿层扩展路径减小，单层岩石发生破坏的概率提高。在矿山、水利水电等地下工程中经常发生层状岩体的弯折破坏^[2]，如煤矿巷道水平顶板的破断^[3]以及高地应力下地下洞室高边墙陡倾岩层的弯折内鼓破坏^[4]等。Hoek 等^[5]指出，层厚与岩层抗弯性能密切相关。根据板壳理论计算^[5]，使薄层岩体（平均层厚小于 10 cm）单层岩石达到其抗拉强度的边界屈服应力理论值为

$$\sigma = \frac{\pi^2 E}{12q^2 (s/t)^2} \quad (1)$$

式中： E 为岩石弹性模量； s 为岩层跨度； t 为岩层厚度； q 为与边界条件有关的常数。该式表明，岩层越薄，抗弯能力越弱。根据现场调查，岩层弯折破坏现象常具有向岩体内部渐次扩展的特点，即由于开挖面上岩层破坏导致深部岩层失去支撑或约束而随之破坏。这为合理预测岩层支护时机及支护深度提出更高要求。因此，深入了解薄层岩体的抗弯性能及破裂模式，对于保障以层状岩体为主的地下工程安全具有重要的理论和实际意义。

研究岩石抗弯性能的主要试验手段是弯曲试验^[6-7]。弯曲试验通常用来测定含预制裂纹岩样的断裂韧性^[8]，同时也常被用于研究岩石的抗拉强度、抗拉模量及裂纹扩展形式等^[9-11]。目前，利用弯曲试验结合扫描电镜^[12]、数字散斑^[13]等技术实现了对岩石从起裂到完全断裂的裂纹扩展全过程观测。另一方面，从数值模拟角度对岩层受弯作用进行分析计算，同样需要考虑岩层的抗弯刚度及强度。对岩层弯曲变形进行模拟主要利用基于 Cosserat 理论的

有限元方法^[1, 14]，以及专门考虑受弯条件下应力特征的板壳单元等，而对岩层裂纹扩展及弯折断裂的模拟，主要借助基于断裂和损伤力学的有限元方法^[3]以及连续介质等效模拟方法^[15]。上述试验技术及数值方法推动了对岩层弯曲变形及破坏机制的进一步研究。层状岩体的特殊性在于其抗弯性能与层厚相关，以及特殊的弯折破坏裂纹扩展方式^[16]，而对于上述两方面地认识仍需进一步加深。

本文主要目的是评价层厚对岩层抗弯性能的影响，探讨含层理岩石中裂纹扩展路径的特点，以及如何利用弯曲试验求取平行于岩层方向的拉伸模量。首先，利用三点弯曲试验对薄层岩体中单层岩石试样及含弱面岩石试样进行测试，得到层厚与变形及强度之间的关系。进而通过显微设备观察裂纹在含层理岩石中的扩展路径，总结归纳层状岩体中不同类型的裂纹扩展方式及其工程意义。最后借助应变测量技术，探究拉压模量不等的前提下岩石拉伸模量的迭代计算方法。

2 试验方法

2.1 试样制备

试验所用岩样取自在建的乌东德水电站导流洞及地下厂房区域。导流洞试样为薄层灰岩，层理明显，方解石层之间充填有机质及绢云母（含量约 2%），构成岩石中的软弱面，层理厚度约 1~5 mm，见图 1(a)；地下厂房试样由薄层灰岩的单层岩石切割打磨而成，层理明显，但与导流洞灰岩不同之处在于构成层理的物质是混杂了不同含量有机质的方解石，宏观表现为微层颜色上的差异，而层理之间不存在软弱面，微层厚度小于 1 mm，见图 1(b)。

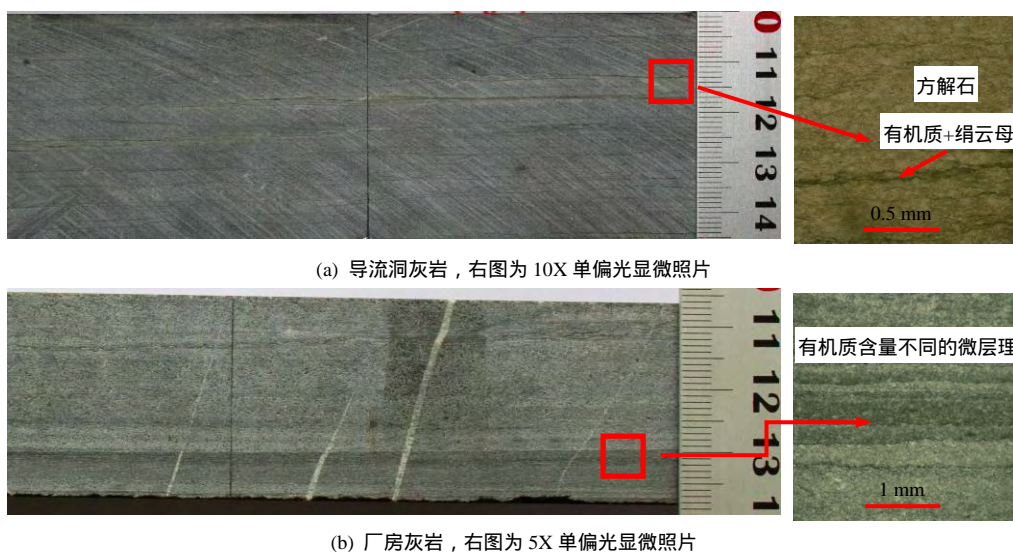


图 1 弯曲试验岩样

Fig.1 Bending test specimens

将所取岩样加工成约 200 mm×50 mm×h (h 为试样厚度, 20 ~ 50 mm) 的长方体试样, 并将各端面打磨平整。试验前在试样预定受拉面及前、后两侧面中心位置预先粘贴胶基电阻应变片 (阻值: 120±0.1% Ω, 灵敏系数: 2.12 ± 1.3%, 栅长×栅宽: 5 mm×3 mm), 应变片栅长方向与试样长轴方向及拉应力方向一致, 应变片位置见图 2, 其中在试样受拉面中心线上对称粘贴两片, 在试样前后侧表面中部各粘贴一片, 部分试样仅在受拉面中心位置粘贴一片应变片。根据前期同类岩石的室内试验结果, 将该种灰岩 (平行层理方向) 的基本物理力学参数列于表 1。

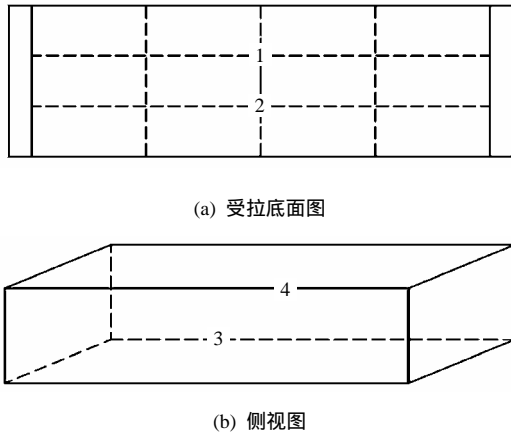


图 2 电阻应变片贴法

Fig.2 Schematic view of strain gauge configuration

表 1 灰岩试样基本物理力学参数

Table 1 Basic parameters of limestone specimens

天然密度 /(g/cm ³)	孔隙率 /%	纵波波速 /(m/s ¹)	弹性模量 /GPa	泊松比	黏聚力 /MPa	内摩擦角 /(°)
2.74	<1	>5 000	50 ~ 80	0.26	20	48

2.2 试验设备及控制参数

三点弯曲试验在中国科学院武汉岩土力学研究所 MTS815.04 试验系统上完成。试验加载控制方式为受拉面平均挠度控制, 即利用两个 LVDT 所测的受拉面挠度平均值作为反馈控制量, 实际加载速率约 1.7×10⁻⁴ mm/s。跨距设置以支撑辊轴距试样端部 2.0 ~ 2.5 cm 为准, 即实际跨距约 15 ~ 16 cm。试验前将应变片与电阻应变仪进行连接并调节至平衡, 试验过程中同步采集应变数据, 采样周期为 2 s, 试验终止条件由试验机控制软件按当前力与峰值力之比自行判定, 试验在恒定的室温条件下进行, 试样层理与加载方向的关系如图 3 所示。

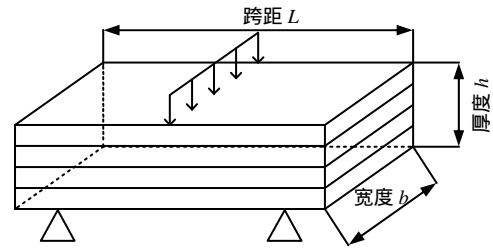
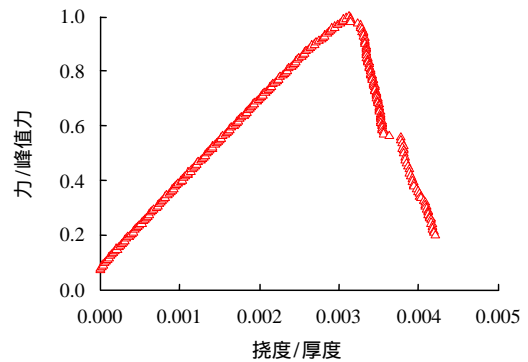


图 3 试样层理与加载方向的关系示意图

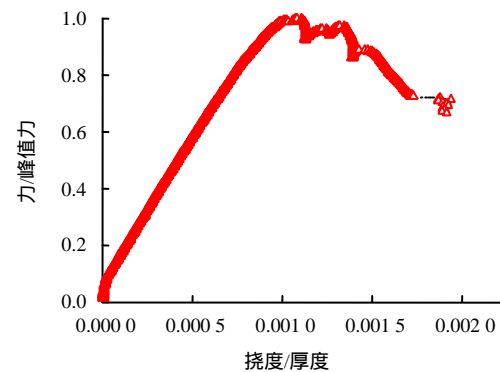
Fig.3 Schematic view of bedding with respect to loading direction

3 试验结果及分析

典型试样的挠度-力曲线如图 4 所示。对于厂房灰岩, 试验曲线表现出弹脆性特征, 峰前力与挠度呈现良好的线性关系, 峰后随着裂纹不断扩展, 力急剧跌落, 见图 4(a)。导流洞灰岩峰前曲线同样具有明显的线性特征, 仅在靠近峰值时表现为非线性, 但峰后特征与厂房灰岩不同, 表现为力随挠度增加而逐级缓慢降低, 见图 4(b)。这一差异与导流洞灰岩的裂纹扩展方式有关, 弱面的存在使裂纹并非完全按 I 型裂纹方式扩展, 而是呈现断续扩展与裂纹转折。有关裂纹扩展的内容详见第 4 节。



(a) 厂房灰岩 (编号 3-1)



(b) 导流洞灰岩 (编号 D-4)

图 4 典型挠度-力曲线

Fig.4 Typical deflection-force curves

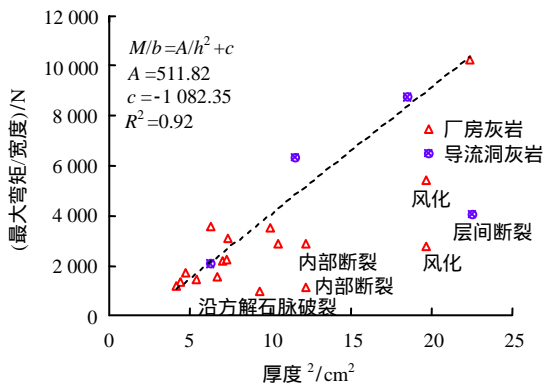
试样厚度与其抗弯性能的关系如图 5 所示。理论上对于均质各向同性岩石，如果认为其受拉面中线拉应力达到岩石抗拉强度时对应的弯矩为其峰值弯矩，则有

$$\sigma_t = \frac{M h}{I 2} = M \frac{12 h}{b h^3 2} = \frac{6 M}{h^2 b} \quad (2)$$

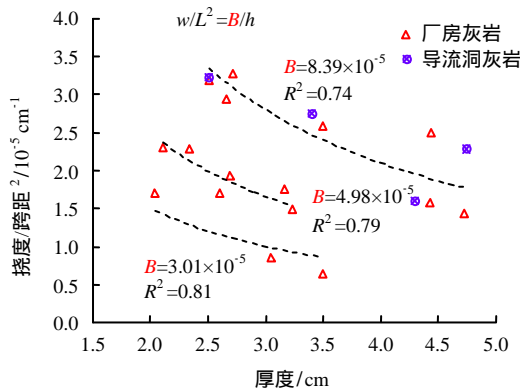
式中： σ_t 为岩石抗拉强度； M 为峰值弯矩； h 为厚度； b 为宽度； I 为截面惯性矩。

整理得到单位宽度的最大弯矩为

$$\frac{M}{b} = \frac{\sigma_t h^2}{6} \quad (3)$$



(a) 厚度与最大弯矩



(b) 厚度与峰值力对应的挠度

图 5 试样厚度与抗弯性能的关系

Fig.5 Relationships between flexural behavior and sample thickness

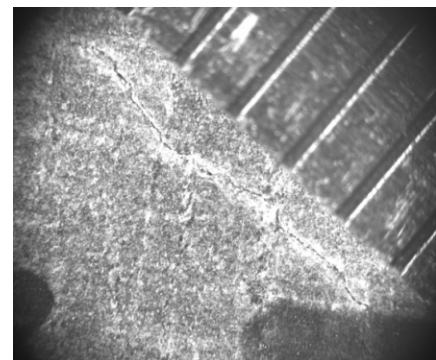
考虑到通常情况下受拉面起裂是在峰值力之前，因而实际峰值弯矩不等于起裂时弯矩，故在拟合公式 (A 为拟合参数， R^2 为拟合优度确定系数，下同) 二次项后添加一拟合参数 c ，最优拟合曲线见图 5(a)。结果表明，试验数据所反映的规律基本与材料力学理论公式一致。复合材料领域对叠层材料的正应力计算多考虑各层材料的弹性参数差异，由于层状岩石层与层之间材料弹性参数可认为无差别，因而，多层材料公式可退化为均质各向同性体

公式。此外，由于横观各向同性体纯弯条件下正应力公式过于复杂，本文中暂不考虑。事实上，不论单层岩石还是含弱面岩石，峰值力（弯矩）对应的均为拉裂纹初期扩展，并未产生扩展路径的转折现象，此时弱面之间无相对错动，试样达到峰值力时刻的应力场分布是可以均质体公式进行计算的。

公式拟合时剔除了 6 个数据异常点，检查破坏后试样发现，造成数据异常的原因可分为 3 种：一是岩石材料自身有一定程度的风化（见图 6(a)）而造成强度降低；二是沿其他弱面断裂，如灰岩中常见的方解石细脉（见图 6(b)）；三是裂纹并未自受拉面起裂，而是自试样内部（对于导流洞灰岩表现为层间断裂）起裂，且裂纹并未扩展至试样表面。排除上述干扰因素之后，可以认为，对于正常受弯起裂的未风化岩层，其单宽极限弯矩与试样厚度的平方成正比，而对于风化岩层其抗弯性能明显降低。



(a) 风化岩石



(b) 沿方解石脉破裂 (标尺刻度为 1 mm)

图 6 试验异常数据原因分析

Fig.6 Reasons for abnormal data

根据均质各向同性介质的梁的挠度理论公式有

$$w_{max} = \frac{F_{max} L^3}{48 E_f I} = \frac{F_{max} L^3}{4 E_f b h^3} = \frac{\sigma_t L^2}{6 E_f h} \quad (4)$$

式中： w_{max} 为峰值力对应挠度； F_{max} 为峰值力； L 为跨距； E_f 为弯曲模量。

整理式(4)得到峰值力对应挠度与试样厚度关

系为

$$\frac{w_{max}}{L^2} = \frac{\sigma_t}{6E_f h} \quad (5)$$

利用式(5)拟合试验数据,得到峰值力对应挠度与试样厚度的拟合曲线(B 为拟合参数),如图5(b)所示。拟合结果表明,试验数据所反映的规律基本可以用式(5)进行描述,即当跨距及材料参数一定时,峰值力对应挠度与试样厚度成反比。这表明岩层越薄,可能发生的弯曲变形越明显。但由于试样自身的离散性及力学性质差异,实际的拟合参数在一定范围内变化。

4 弯折破裂裂纹扩展路径

由于加载速率足够小以及试验系统刚度足够大,试验过程中试样裂纹的扩展是渐进式的,试验终止时并没有发生试样完全断裂,裂纹通常自受拉面中线附近起裂,并自受拉面向试样内部扩展。通过显微照片对裂纹扩展路径细节进行观察,可以发现,不同类型的层理及弱面对裂纹扩展路径具有不同影响,详见图7。

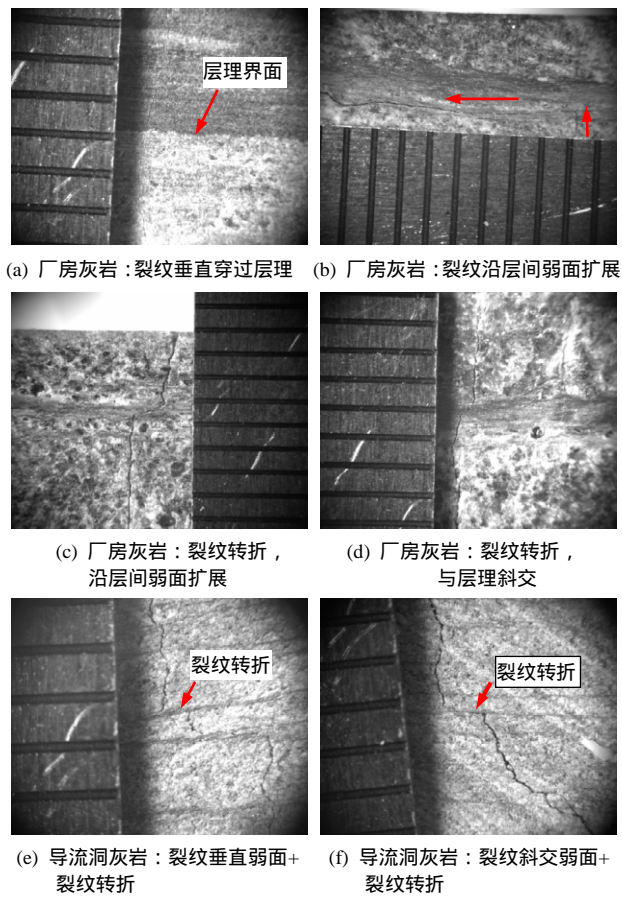


图7 薄层岩体中裂纹扩展的不同路径
(图中横条为标尺,刻度1 mm)

Fig.7 Different paths of cracks in thin-bedded rock mass
(calibration: 1 mm)

根据图7所示的裂纹扩展现象,可以将薄层岩体弯折破裂分为以下模式: 裂纹垂直穿过层理界面,以I型裂纹方式扩展,层理界面对裂纹扩展方向无影响(见图7(a)、(e)); 裂纹在层理界面处偏转一定角度,与层理斜交(见图7(d)); 裂纹在弱面处偏转,并沿弱面方向扩展一定距离,再转向与层理垂直方向继续扩展(见图7(b)、(c)、(e)、(f))。这说明与各向同性岩体相比,软弱界面的存在使薄层岩体受弯破裂形态表现出明显不同的特点,即同时具备I型、复合型及层面剪切滑移等特征^[17]。

层状介质中裂纹扩展路径问题是断裂力学中的一个基本问题^[18],同时也是地质学^[19]及油气开采^[20]较为关心的问题。普遍认为,实际发生的裂纹路径是裂纹尖端应力场与界面强度及材料强度之间相互竞争的结果^[21]。根据对层状介质裂纹扩展的研究成果,可对上述破裂模式做如下解释: 仅考虑裂纹与层理/弱面垂直的情况,定义材料抗拉强度为 σ_{mt} 、弱面抗拉强度为 σ_{it} 、弱面抗剪强度为 σ_{is} 、材料I型断裂韧度(以单位面积断裂能表示,下同)为 G_{lm} 、弱面I型断裂韧度为 G_{li} 、弱面II型断裂韧度为 G_{lis} 、裂纹尖端应力各分量如图8所示。假设裂纹垂直层弱及沿弱面扩展一个微小长度、材料I型裂纹能量释放率为 R_{lm} 、弱面I型裂纹能量释放率为 R_{li} 。根据应力与强度(或断裂韧度)的关系,有:

(1) 裂纹终止于弱面,并沿层面剪切滑移的条件^[22]为 $\sigma_{xy} = \sigma_{is}$,且 $\sigma_{yy} < \sigma_{mt}$ 。

(2) 裂纹终止于弱面,并沿弱面发生I型扩展的条件为 $\sigma_{xx} = \sigma_{it}$,且 $\sigma_{it}/\sigma_{mt} < \alpha$ ^[23](从应力角度定义);或 $R_{li} < G_{li}$,且 $G_{li}/G_{lm} < \beta$ ^[24](从能量角度定义),其中 α , β 为与材料弹性参数及边界应力有关的常数。

(3) 裂纹穿过弱面并继续扩展的条件为 $\sigma_{xy} < \sigma_{is}$ 、 $\sigma_{xx} < \sigma_{it}$,同时 $\sigma_{yy} = \sigma_{mt}$, $\sigma_{it}/\sigma_{mt} > \alpha$;或 $R_{li} < G_{li}$,且 $G_{li}/G_{lm} > \beta$,如破裂模式。

研究表明,通过裂纹尖端应力各分量(或能量释放率)与层面及材料强度(或断裂韧度)进行比较,可以得出层状介质中控制裂纹路径扩展的力学条件。条件当中的强度及断裂韧度可通过室内试验测定,而裂纹尖端应力分量可通过断裂力学理论计算获得。据相关计算^[21], α 约为0.28, β 约为0.26,这意味着若材料抗拉强度为6 MPa(试样抗拉强度平均值),则当弱面抗拉强度小于1.68 MPa时,裂纹将终止于弱面并沿弱面扩展,对于胶结强度很低的弱面这一条件容易满足,因而,实际岩体中层内裂纹扩展常终止于层面。考虑到弱面抗拉强度通常

难以测定，因此，可以通过测定弱面 I 型断裂韧度替代抗拉强度作为裂纹偏转的判据。从破裂模式的表现来看，很可能兼有沿弱面剪切裂纹扩展及 I 型裂纹扩展，即实际产生的是一种复合型裂纹。随着加载持续进行，当裂纹沿弱面扩展一定距离后，将再次发生偏转而继续在完整岩石中产生 I 型裂纹，文献[19]对裂纹在层面另一侧的起裂行为给出了比较合理地解释。对于裂纹在层理界面处发生偏转并与层理斜交这一现象(如破裂模式)，其主控因素为层面两侧岩石弹性参数，文献[24 - 26]中利用断裂力学理论进行了详细探讨，本文不再详述。

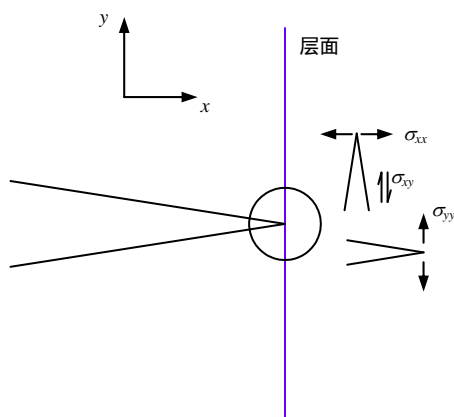
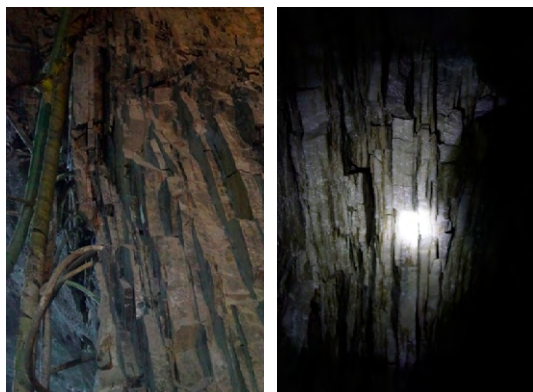


图 8 与层面垂直相交或沿层面扩展的裂纹尖端应力
Fig.8 Crack tip stress field when crack is perpendicular to interface or along interface

对乌东德水电站现场隧洞开挖后薄层岩体破裂方式进行观察发现(见图 9)，当边墙开挖卸荷回弹后，对于近直立的陡倾薄层岩体，由于受逐渐增大的切向应力作用产生局部弯折破坏现象，其断裂形式主要为单层岩石内部的拉断，而层面对裂纹向其他层扩展起抑制作用。岩层自内部断裂后，若该层与其他层接触部分的层面抗剪力足以抵消破断后的



(a) 薄层灰岩层内断裂 (b) 极薄层大理岩化白云岩层内断裂

图 9 现场薄层岩体层内破裂形式
Fig.9 Fracture modes of in-situ thin-bedded rock mass

岩层自重，则该岩层不会发生滑落；若层面抗剪力小于岩层自重或由于差异卸荷回弹造成岩层之间发生离层现象，则可能导致该单层岩石完全脱离于周围岩体，形成岩层剥落。

5 拉伸模量

根据受拉面中心的实测拉应变以及同一位置拉应力的理论解，可以方便地求得平行层理方向的岩石拉伸模量。考虑应变片长度的拉应变平均值为

$$\begin{aligned} \varepsilon_t &= \frac{1}{2l} \int_{-l}^l \frac{\sigma_x}{E_t} dx = \\ &= \frac{1}{2lE_t} \left(\int_{-l}^0 \frac{F \left(\frac{L+x}{2} \right) \frac{h}{2}}{I} dx + \int_0^l \frac{F \left(\frac{L-x}{2} \right) \frac{h}{2}}{I} dx \right) = \\ &= \frac{1}{E_t} \frac{3F}{2bh^2} (L-l) \end{aligned} \tag{6}$$

式中： l 为应变片半栅长； E_t 为拉伸模量。

试验中试样侧面中部(理论中性层位置)的应变片测得一定量值的拉应变，表明试样实际受拉区由中性层位置上移。考虑到岩石拉压模量通常不相等的特点^[27]，有理由认为，试样的拉伸模量小于压缩模量。此时受拉区高度为^[28]

$$h_p = \frac{\sqrt{E_n}}{\sqrt{E_t} + \sqrt{E_n}} h \tag{7}$$

式中： E_n 为压缩模量

考虑受拉区上移的修正拉应力公式为^[28]

$$\sigma_x^1 = \frac{3M}{bh^3} \frac{(\sqrt{E_t} + \sqrt{E_n})^2}{E_n} h_p \tag{8}$$

考虑应变片长度的修正拉应变平均值为

$$\begin{aligned} \varepsilon_t &= \frac{1}{2l} \int_{-l}^l \frac{\sigma_x^1}{E_t} dx = \\ &= \frac{3}{2lE_tbh^3} \frac{(\sqrt{E_t} + \sqrt{E_n})^2}{E_n} h_p \left(\int_{-l}^0 \frac{F}{2} \left(\frac{L+x}{2} \right) dx + \right. \\ &\quad \left. \int_0^l \frac{F}{2} \left(\frac{L-x}{2} \right) dx \right) = \frac{1}{E_t} \frac{3F}{4bh h_p} (L-l) \end{aligned} \tag{9}$$

由于计算 E_t 需要受拉区高度参数 h_p ，而 h_p 与拉压模量均有关，因此，实际计算是一个迭代过程，即根据式(6)先计算出 E_t 的迭代初值 E_{t0} ，然后代入式(7)求解 h_p ，最后根据式(9)计算 E_t ，迭代

终止条件为前、后两次计算的 E_t 之差小于设定值 t_0 。以试样 3-1 为例，表 2 列出了迭代计算结果。

表 2 拉伸模量迭代计算表

压缩模量 /GPa	拉伸模量 /GPa				
	第 1 次 迭代	第 2 次 迭代	第 3 次 迭代	第 4 次 迭代	第 5 次 迭代
70	67.9	67.8	67.8		
75	66.7	66.3	66.3		
80	65.7	65.1	64.9	64.9	
85	64.8	64	63.8	63.7	63.7

注：计算参数为 $L=17\text{ cm}$ ， $h=2.108\text{ cm}$ ， $E_{t0}=68.3\text{ GPa}$ ， $t=0.1\text{ GPa}$ 。

计算表明，拉伸模量与压缩模量越接近，迭代次数越少，收敛值与初始值越接近。对测试试样的拉伸模量（按迭代初值计算）进行统计，结果见图 10（图中百分数表示分位数，其中 25% 表示下四分位数，50% 表示中位数，75% 表示上四分位数），图中同时给出同种岩石巴西劈裂试验及三轴压缩试验测定的拉伸模量及压缩模量。结果表明，该种岩石的拉、压模量比较接近，因此，在数值计算时可以不加区别。严格来讲，洞室开挖围岩应力调整后，对于最小主应力转变为拉应力的局部岩体^[29-30]，利用岩石拉伸模量计算其收敛变形量更为合理。

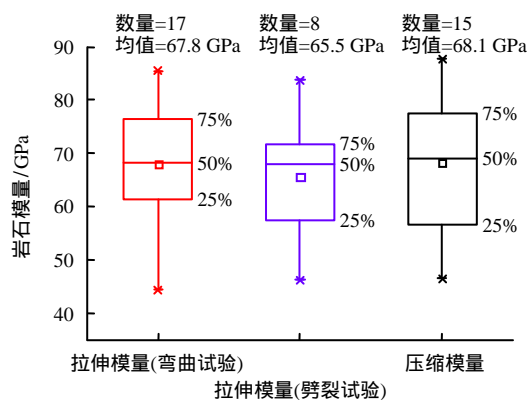


图 10 岩石模量统计箱线图
Fig.10 Boxplot of rock moduli

6 结论

(1) 薄层岩体的抗弯性能与层厚密切相关，对于正常受弯的完整新鲜岩层，单宽极限弯矩与层厚的平方成正比，而峰值力对应挠度与岩梁跨度及层厚均有关；

(2) 由于层理及弱面的存在，薄层岩体破裂模式呈现多样化，既有垂直穿过层理的 I 形裂纹，也有在弱面处发生转折并沿弱面扩展的断续裂纹，以

及与层理斜交的复合型裂纹等。不同的裂纹扩展路径与裂纹尖端应力、层面强度及岩石强度均有关。现场薄层岩体最为常见的破裂形式为终止于层面的层内 I 型破裂；

(3) 由于岩石材料双模量的特点，利用弯曲试验求解岩石拉伸模量是一个迭代过程，拉、压模量相差越大，迭代次数越多，收敛值越偏离初值。试验中测定的拉伸模量与压缩模量较为接近，在数值计算时可不进行区分。但对于拉、压模量差别明显的岩石，计算时应当考虑在不同应力子空间使用不同模量。

致谢：拍摄裂纹扩展路径的光学设备由纪维伟提供，在此深表谢意。此成果由中国长江三峡集团公司资助，特此致谢。

参考文献

- [1] RIAHI A. 3-D finite element Cosserat continuum simulation of layered geomaterials[D]. Toronto: University of Toronto, 2008.
- [2] LISJAK A. Investigating the influence of mechanical anisotropy on the fracturing behaviour of brittle clay shales with application to deep geological repositories[D]. Toronto: University of Toronto, 2013.
- [3] 贾蓬, 唐春安, 王述红. 巷道层状岩层顶板破坏机理[J]. 煤炭学报, 2006, 31(1): 11 - 15.
JIA Peng, TANG Chun-an, WANG Shu-hong. Destroy mechanism of tunnel with stratified roof[J]. *Journal of China Coal Society*, 2006, 31(1): 11 - 15.
- [4] 吴文平, 冯夏庭, 张传庆, 等. 深埋硬岩隧洞围岩的破坏模式分类与调控策略[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(9): 1782 - 1802.
WU Wen-ping, FENG Xia-ting, ZHANG Chuan-qing, et al. Classification of failure modes and controlling measures for surrounding rock of deep tunnel in hard rock[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2011, 30(9): 1782 - 1802.
- [5] HOEK E, BROWN E T. Underground excavations in rock[M]. London: Institution of Mining and Metallurgy, 1980.
- [6] EXADAKTYLOS G E, VARDOULAKIS I, KOURKOULIS S K. Influence of nonlinearity and double elasticity on flexure of rock beams—I. Technical theory[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2001, 38(22): 4091 - 4117.
- [7] 王启智, 汪坤. 脆性材料三点弯曲试样的最大荷载及

- 其挠度和刚度[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2005, 37(6): 1 - 5.
- WANG Qi-zhi, WANG Kun. Maximum load and its deflection and stiffness for three-point bending specimens of brittle materials[J]. **Journal of Sichuan University(Engineering Science Edition)**, 2005, 37(6): 1 - 5.
- [8] 黄建安, 王思敬. 岩石断裂韧性的试验研究[J]. 岩土工程学报, 1982, 4(2): 67 - 74.
- HUANG Jian-an, WANG Si-jing. Experimental study of the fracture toughness of rocks[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1982, 4(2): 67 - 74.
- [9] 杨同, 王宝学, 高谦, 等. 岩石弯曲拉伸试验研究[J]. 勘察科学技术, 2005, (6): 3 - 5, 53.
- YANG Tong, WANG Bao-xue, GAO Qian, et al. Study on bending tensile tests of rock samples[J]. **Site Investigation Science and Technology**, 2005, (6): 3 - 5, 53.
- [10] EXADAKTYLOS G E, VARDOULAKIS I, KOURKOULIS S K. Influence of nonlinearity and double elasticity on flexure of rock beams—II. Characterization of Dionysos marble[J]. **International Journal of Solids and Structures**, 2001, 38(22): 4119 - 4145.
- [11] 左建平, 黄亚明, 刘连峰. 含偏置缺口玄武岩原位三点弯曲细观断裂研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(4): 740 - 746.
- ZUO Jian-ping, HUANG Ya-ming, LIU Lian-feng. Investigation on meso-fracture mechanism of basalt with offset notch based on in-situ three-point bending tests[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2013, 32(4): 740 - 746.
- [12] 左建平, 柴能斌, 周宏伟. 不同深度玄武岩的三点弯曲细观破坏实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(4): 689 - 695.
- ZUO Jian-ping, CHAI Neng-bin, ZHOU Hong-wei. Investigation on failure behavior of basalt from different depths based on three-point bending meso-experiments[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 32(4): 689 - 695.
- [13] 代树红, 王召, 马胜利, 等. 裂纹在层状岩石中扩展特征的研究[J]. 煤炭学报, 2014, 39(2): 315 - 321.
- DAI Shu-hong, WANG Zhao, MA Sheng-li, et al. Study on characteristics of crack propagation in stratified rock[J]. **Journal of China Coal Society**, 2014, 39(2): 315 - 321.
- [14] 王启耀, 蒋臻蔚, 杨林德. 层状岩体巷道弯曲变形的有限元模拟[J]. 岩土力学, 2006, 27(7): 1101 - 1104.
- WANG Qi-yao, JIANG Zhen-wei, YANG Lin-de. Numerical modeling of flexural deformation of laneway in layered rock mass[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 27(7): 1101 - 1104.
- [15] 王学滨, 张君. 考虑抗拉强度及峰值后软化曲线非均质性的混凝土梁三点弯破坏过程数值模拟[J]. 工程力学, 2009, 26(12): 155 - 160.
- WANG Xue-bin, ZHANG Jun. Numerical simulation of failure process of three-point bending concrete beam considering heterogeneity of tensile strength and post-peak softening curve[J]. **Engineering Mechanics**, 2009, 26(12): 155 - 160.
- [16] CLEGG W J, KENDALL K, ALFORD N M N, et al. A simple way to make tough ceramics[J]. **Nature**, 1990, 347(6292): 455 - 457.
- [17] 黎立云, 宁海龙, 刘志宝, 等. 层状岩体断裂破坏特殊现象及机制分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(增刊 2): 3933 - 3938.
- LI Li-yun, NING Hai-long, LIU Zhi-bao, et al. Special phenomena of fracture and mechanism analysis of layered rock mass[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2006, 25(Supp. 2): 3933 - 3938.
- [18] HUTCHINSON J W, SUO Z. Mixed mode cracking in layered materials[J]. **Advances in Applied Mechanics**, 1991, 29: 63 - 191.
- [19] HELGESON D E, AYDIN A. Characteristics of joint propagation across layer interfaces in sedimentary rocks[J]. **Journal of Structural Geology**, 1991, 13(8): 897 - 911.
- [20] 李庆彬. 砂/泥岩界面垂直裂缝扩展规律研究[D]. 大庆: 东北石油大学, 2013.
- LI Qing-bin. Vertical crack propagation law research of sand/mudstone interface[D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2013.
- [21] STROM J L, PARMIGIANI J P. Transition of crack path at bi-material interfaces[J]. **Engineering Fracture Mechanics**, 2014, 115: 13 - 21.
- [22] RENSHAW C E, POLLARD D D. An experimentally verified criterion for propagation across unbounded frictional interfaces in brittle, linear elastic materials[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts**, 1995, 32(3): 237 - 249.

- characteristics of the earth-rock aggregate[D]. Chengdu: Xihua University, 2007.
- [30] 陈缪芬, 高庄平, 朱俊高, 等. 粗粒土级配及颗粒破碎分形特性[J]. 中南大学学报:自然科学版, 2015(9):3446 - 3453.
- CHEN Liu-fen, GAO Zhuang-ping, ZHU Jun-gao, et al. Gradation of coarse grained soil and fractal geometry character of particle breakage[J]. **Journal of Central South University (Science and Technology)**, 2015, (9):3446 - 3453.
- [31] DELUZARCHE R, CAMBOU B, FRY J J. Modeling of rockfill behavior with crushable particles[C]// Proceedings of the First International PFC Symposium. Germany: Gelsenkirchen, 2002: 219 - 224.
- [32] 黄青富, 詹美礼, 盛金昌, 等. 基于颗粒离散单元法的获取任意相对密度下级配颗粒堆积体的数值方法[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(3): 537 - 543.
- HUANG Qing-fu, ZHAN Mei-li, SHENG Jin-chang, et al. Numerical method to generate granular assembly with any desired relative density based on DEM[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2015, 37(3): 537 - 543.
- [33] EMILIEN A, FARHANG R. Stress-strain behavior and geometrical properties of packings of elongated particles.[J]. **Physical Review E**, 2010, 81(5 Pt 1): 703 - 708.
- [34] MUETH D M, JAEGER H M, NAGEL S R. Force distribution in a granular medium[J]. **Physical Review E Statistical Physics Plasmas Fluids & Related Interdisciplinary Topics**, 1999, 57(3): 3164 - 3169.
- [35] RADJAI F, JEAN M, MOREAU J J, et al. Force distributions in dense two-dimensional granular systems.[J]. **Physical Review Letters**, 1996, 77(2):274 - 277.

上接第 1902 页

- [23] GUPTA V, ARGON A S, SUO Z. Crack deflection at an interface between two orthotropic media[J]. **Journal of Applied Mechanics**, 1992, 59(2S): S79 - S87.
- [24] HE M Y, HUTCHINSON J W. Crack deflection at an interface between dissimilar elastic materials[J]. **International Journal of Solids and Structures**, 1989, 25(9): 1053 - 1067.
- [25] COOKE M L, UNDERWOOD C A. Fracture termination and step-over at bedding interfaces due to frictional slip and interface opening[J]. **Journal of Structural Geology**, 2001, 23(2): 223 - 238.
- [26] DYSKIN A V, CABALLERO A. Orthogonal crack approaching an interface[J]. **Engineering Fracture Mechanics**, 2009, 76(16): 2476 - 2485.
- [27] 倪国荣, 禹奇才. 不同模量弹性理论在岩石工程中的应用[J]. 长沙铁道学院学报, 1990, 8(4): 98 - 105.
- NI Guo-rong, YU Qi-cai. The application of varimodular theory of elasticity to rock engineering[J]. **Journal of Changsha Railway Institute**, 1990, 8(4): 98 - 105.
- [28] 姚文娟, 叶志明. 不同模量横力弯曲梁的解析解[J]. 应用数学和力学, 2004, 25(10): 1014 - 1022.
- YAO Wen-juan, YE Zhi-ming. Analytical solution for bending beam subject to lateral force with different modulus[J]. **Applied Mathematics and Mechanics**, 2004, 25(10): 1014 - 1022.
- [29] 郝宪杰, 冯夏庭, 李邵军, 等. 柱状节理玄武岩隧洞破坏模式及其力学机制模拟[J]. 岩土力学, 2015, 36(3): 837 - 846.
- HAO Xian-jie, FENG Xia-ting, LI Shao-jun, et al. Failure mode of columnar jointed basalt tunnel and its mechanism simulation[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2015, 36(3): 837 - 846.
- [30] 鲁建荣. 基于厚壁筒三维解析模型的深部洞室围岩分区破裂化机制研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(9): 2673 - 2684.
- LU Jian-rong. Mechanism of zonal disintegration within surrounding rock of deep tunnel based on 3D analytical model of thick-wall cylinder[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2014, 35(9): 2673 - 2684.