

基于单轴压缩声发射试验的层状岩体损伤规律分析

李洪刚

(成都理工大学 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 成都 610059)

摘要:层状岩体的损伤破坏规律是岩土工程研究领域中的重要问题之一。以含层理倾角岩体为研究对象,对现有的单轴压缩声发射试验成果开展试验分析、理论研究和数值模拟。结果表明,层理构造对岩体破坏模式影响显著;利用声发射信号响应特征描述层状岩体在轴向荷载作用下损伤破坏规律具有良好效果;基于改进 Duncan 模型建立的新损伤模型适用于层状岩体在轴向荷载作用下的损伤演化分析,并利用有限元数值模拟对模型做了进一步验证。研究成果可为层状岩体损伤规律的后续研究提供一定的理论参考和技术支持。

关键词:层状岩体;声发射;Duncan 模型;数值模拟

中图分类号:TU452 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-1807(2023)03-0209-08

滑坡是最常见的地质灾害类型之一,其中以岩质滑坡居多。探究岩质滑坡的触发机制、明确岩体变形破坏机理是对滑坡进行有效防治的关键所在。而自然界中的岩体大多为发育节理裂隙、结构面或含不同岩性的层状岩体,因此对层状岩体损伤破坏机理的研究显得至关重要。

对于岩体损伤的研究已有长期历史,其中用声发射参数描述岩体损伤规律以其快速、直观的优点而备受推崇^[1]。目前常用的声发射表征参数都是直接通过声发射仪器得到的时域或者频域参数,如振铃计数、事件计数、振幅、持续时间等。唐春安等^[2]用声发射振铃计数定义损伤变量,首次建立了声发射参数与岩体损伤演化之间的关系,在运用声发射研究岩石损伤问题上跨出了关键一步;刘运思等^[3]通过单轴与巴西试验,对层状砂岩的抗拉压强度、破坏模式与声发射信号之间的关系进行了研究;牟宏伟等^[4]通过室内单轴压缩试验研究了不同层理倾角煤岩的力学特性及其与声发射信号之间的关系;王守光等^[5]对完整的和不同倾角预裂纹石膏试件进行单轴压缩试验,运用声发射和波速监测技术研究了其损伤破坏机制与特性;赵小平等^[6]通过观察完整软岩在加载破坏过程中的声发射现象和振幅分布规律,利用声发射振幅分布 b 值法说明了完整和裂隙煤岩体在单轴加载条件下的损伤演化过程及差异。随后,张东明等^[7]以层理及均质岩石为试件

开展单轴压缩试验,进一步研究了层状岩体的损伤破坏规律,并根据改进 Duncan 构建了层状岩体在单轴荷载作用下的损伤破坏模型。Hu 等^[8]通过创建一系列具有双填充缺陷和圆孔的单轴压缩模型,对其进行模拟,结果表明填充缺陷和孔洞的存在降低了模型的力学性能,同时发现声发射事件的源类型和 b 值与填充缺陷的位置和倾角有关。Wu 等^[9]采用一种新型岩石力学性能测试系统,结合 AE 技术获得了不同倾角和加载速率下煤样力学性能的变化规律,发现当试件倾角为 10° 时,随着加载速率的增加,累积 AE 数和能量呈现出非线性递减趋势;Niu 等^[10]将砂岩材料制作成微观结构为块状矿物颗粒和一定数量的微小裂缝的孔隙试件,利用局部空间声发射事件的前兆响应率,预测了砂岩在双轴压缩和真三轴压缩条件下的失稳时间。

以上分析不难发现,学者们对完整岩石以及预裂纹岩石的损伤破坏问题已经进行了相当数量的研究,并取得了较为丰硕的成果,然而对于更接近天然状态的裂隙岩体和层状岩体损伤破坏规律研究的报道还并不多见。关于层状岩体的损伤破坏模式及声发射响应规律更是缺乏较为规律性的认识。因此本文对基于声发射的层状岩体损伤研究开展进一步分析,首先对张东明等^[7]所开展的层状岩体单轴压缩声发射试验进行对比分析,总结出层状岩体单轴损伤破坏的共性规律,然后利用试验数

收稿日期:2022-09-03

作者简介:李洪刚(1997—),男,四川泸州人,成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室,硕士研究生,研究方向为岩土工程。

据对改进 Duncan 模型构建的损伤模型进行分析验证,最后通过有限元分析软件 ABAQUS 对试验进行模拟分析,进一步论证该模型的科学性和准确性,以期对后续研究提供有效、科学的理论支持。

1 层状岩体损伤的声发射试验分析

1.1 层状岩体单轴压缩的声发射响应规律试验

前人已开展过许多岩石单轴压缩声发射试验。张东明等^[7]在开展的层理及均质岩石单轴压缩试验中,对层状岩体损伤破坏特征以及损伤演化过程中的声发射响应规律进行了分析,试验概况如下:

1.1.1 试件制备与试验设备

试件材料取自某地下采矿场顶板的泥岩和灰岩旋回沉积层,该岩体具有明显的沉积层理构造,为试件提供了优质的天然条件。将试件制作成均质和非均质标准试件各 5 组,其中非均质试件含不同层理倾角,编号依次为 1~5,角度 β 分别为 47° 、 45° 、 48° 、 46° 、 50° 。实验设备由加载系统、声发射采集系统和观测系统组成。加载系统采用岛津 GI-250 材料试验机,声发射系统采用美国 PCI-2 多通道声发射仪。

1.1.2 试验方法与试验结果

加载方式采用位移控制,加载速率为 0.2 mm/min ,加载过程中当试件发生失稳破坏时自动停止加载。将 45 dB 设置为声发射系统采样阈值,采样率设为 1 MSPS 。图 1 和图 2 分别表示加载示意图及 1 号试件加载结果。

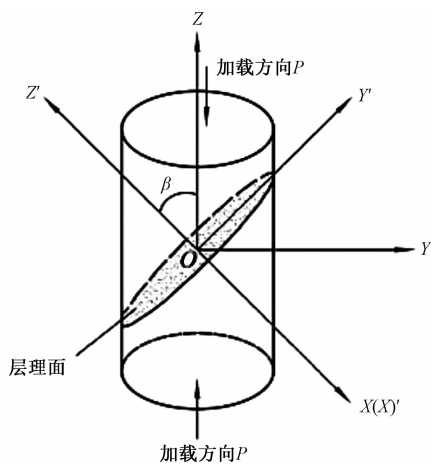


图 1 加载示意图^[11]

1.2 实验结果分析

1.2.1 层状岩体轴向压缩破坏模式分析

对试验结果进行分析,发现 1~5 号非均质试件破坏模式几乎相同,故以 1 号试件为例进行分析。



图 2 加载结果^[7]

如图 2 所示,1 号试件的破坏模式为伴随着宏观主裂纹,并在层理面产生近似平行的次生裂纹,伴随着部分岩石矿物颗粒的剥落,最终形成以层理上下表面为边界的含充填颗粒物的剪切带。观察到样品多条次生裂纹于宏观裂纹的尾部发育,分析认为是试件沿层理破坏的过程中,在层理面摩擦力和轴向应力作用下发生压剪破坏而产生。可以推断,纵向次生裂纹在一定程度上削弱了岩石试件沿层理面的摩擦力,沿软弱层理面产生的宏观主裂纹是导致岩石试件失稳破坏的主要原因。

通过分析试验和其他学者开展的相关研究,发现层状岩体的层理倾角对岩体的破坏模式及特征影响效果显著。例如,丁恒等^[12]通过开展层状灰岩各向异性力学特征的声发射试验,分析单轴压缩下不同层理倾角岩石的破坏规律,得到应力-应变曲线-如图 3 所示;史越等^[11]通过开展不同层理倾角的炭质千枚岩单轴压缩试验,研究单轴加载条件下层状岩石因不同层理倾角而表现出的非线性力学行为以及破坏模式,图 4、图 5 分别为试件模型与试验结果。

分析图 3 可以发现,随着层理倾角的增大,试样峰值应力平均值与倾角呈现出“V”形关系,峰值应力变化趋势为先减小后增大,最低值于倾角 45° 时达到。整体而言,层理角度在 $30^\circ\sim60^\circ$ 的试件平均应力值波动幅度最大,认为层理倾角处于 $30^\circ\sim60^\circ$ 的岩体强度较弱。而当试样倾角变化范围较小时,试样的破坏特征则没有表现出明显差异。如试验中,试样的层理倾角是 $45^\circ\sim50^\circ$,就破坏模式和破坏特征而言并未表现出明显差异,该结论可以从图 5 中得到验证。再观察图 5 发现:当 β 为 0° 、 15° 、 30° 时,岩样发生的是顺层理面和贯穿层理面的张剪复合破坏;当 β 为 45° 和 60° 时,发生的是顺层理面的剪切滑移破坏,并产生了几条贯通层理的竖向次生

裂纹;当 β 为 75° 和 90° 时,岩样则发生贯通性劈裂张拉破坏。

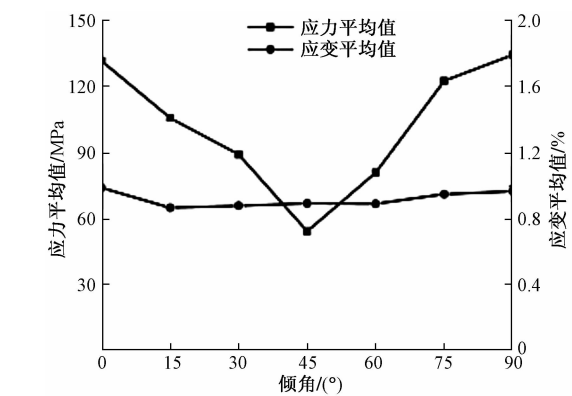


图3 各层理倾角灰岩的应力-应变曲线^[12]

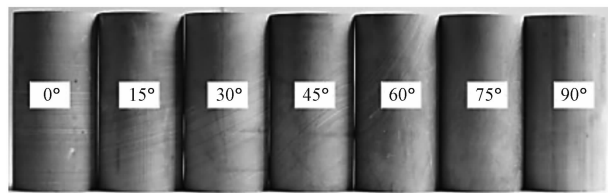


图4 试件模型

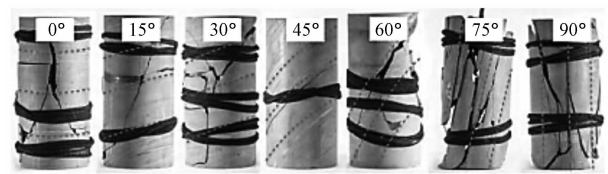


图5 加载结果^[11]

因此,在含层理岩体的岩质边坡防治中,应重点关注层理倾角发育情况,对不同倾角的岩体进行针对性治理,尤其是层理倾角为 $30^\circ\sim60^\circ$ 的岩质边坡,容易发生沿层理面的剪切滑移破坏,应注重软弱层理面的加固以及层理尾部的相关支护工作,增强层理底部岩石的抗拉剪强度,提高层理面与基岩的整体性,尽量防止次生裂纹的萌生和发育。

1.2.2 层状岩体损伤破坏过程中的声发射响应规律分析

采用振幅、Hit 计数率与总计数等参数进行岩石的声发射响应特征分析,根据破裂型 AE 和摩擦型 AE 产生的力学机理,分析岩石内部的损伤演化过程,得到层状岩体单轴损伤破坏机制与声发射信号之间的响应关系。

1 号试件试验数据如图 6 所示,损伤破坏过程中的声发射响应规律如图 7 所示。

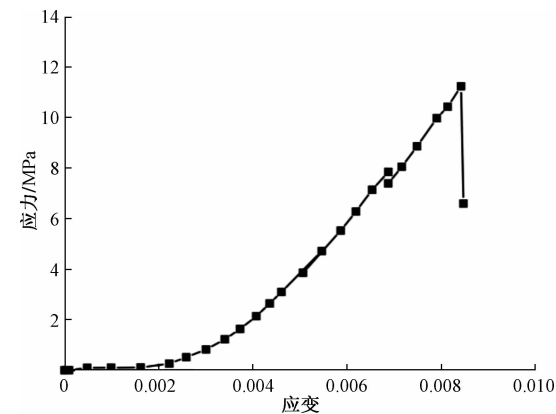
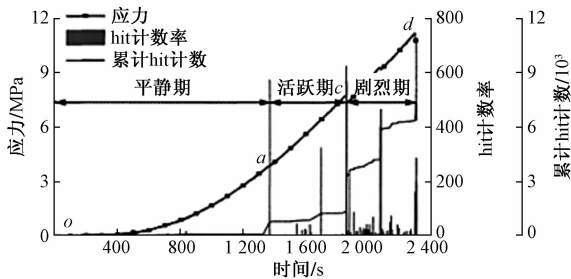
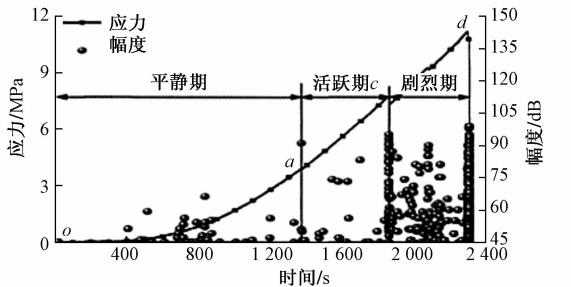


图6 试件应力-应变曲线



(a) 应力、声发射参数



(b) 应力、幅度

图7 应力-声发射参数-时间关系曲线^[7]

分析图 7 发现,层理岩石破坏过程中 AE 参数响应的全过程大致可分为弹性压密(oa)、弹性和微弹性(ac)、塑性变形(cd)3 个阶段。

1)在弹性压密阶段,AE 信号幅度相对较低,Hit 计数率较小。据分析,由于阶段初期应力水平较低,岩石内部损伤以压密原生孔隙和裂隙为主,新裂隙发育较少,AE 信号较弱,声发射信号反馈表现平静,故称该阶段为声发射平静期。

2)在弹性至微弹性或弹塑性阶段,试件伴随着旧裂纹的压密与新裂纹的萌生,逐渐形成纵向贯通的剪切裂隙,当剪切应力大于层理面黏聚力时,层理面形成滑移裂隙,岩体间因摩擦产生低幅低频的 AE 信号,AE 信号反馈较活跃,故称该阶段为声发射活跃期。

3)在塑性变形至破坏阶段,岩石产生高频 Hit 计数,声发射信号反馈剧烈。分析认为试样屈服点 c 在力的持续作用下,岩体由于应力作用沿层理面发生剪切滑移至断裂,产生沿层理的局部剪切破碎带,释放出大量弹性应力波,产生高幅度 AE 信号,从而导致 Hit 计数激增。在此期间,剪切破碎带内岩石颗粒在轴向载荷作用下被压密、摩擦,导致局部剪切破碎带逐渐贯通,形成宏观剪切破碎带。该阶段也称声发射剧烈期。

以上结论可结合丁恒等^[12]、姚欢迎等^[13]开展的研究得到进一步验证。丁恒等^[12]以室内钻取 7 种不同层理倾角的灰岩样进行单轴压缩声发射试验,通过分析 7 种不同倾角试件单轴压缩与声发射响应曲线得出,在单轴压缩过程中,不同倾角岩体的应力降与声发射之间体现出良好的对应关系。其中 45°倾角试件与本文 1 号试件具有很高的对比研究意义,其单轴压缩曲线及声发射撞击数曲线如图 8 所示。图 8 显示,声发射撞击数随着试件损伤破坏表现出明显的三阶段特征。据分析,试件内部经历了类似本文中 1 号试件的压密—剪切滑移—剪切破碎 3 个损伤破坏阶段。3 个阶段在图 8 中对应的轴向应变范围分别是 0%~0.4%、0.4%~0.6%、0.6%~0.8%。再结合图 7,从声发射撞击数的反馈来看,认为该 3 阶段分别对应声发射响应的平静期、活跃期以及剧烈期。姚欢迎等^[13]通过开展陆相页岩单轴压缩声发射试验,其中含平行层理的 3 号试件单轴压缩过程中的声发射撞击数、撞击累计数随时间的变化曲线如图 9 所示。分析发现,含平行层理页岩试件的声发射响应与岩石破坏的压密—弹性与弹塑性—塑性变形及峰后破坏阶段同样存在着良好的对应关系,并根据声发射响应特征将各阶段命名为平静期、活跃期及剧烈期。

以上分析可以得出:层状岩石单轴压缩过程中,不同倾角岩石的应力降与声发射之间体现出良好的对应关系,相似的破坏模式对应着近似的 3 个破坏阶段,用声发射参数描述层状岩体在轴向荷载作用下的损伤破坏规律具有良好效果。

2 理论分析和优化

2.1 基于声发射参数构建的岩体一维损伤方程

目前利用声发射手段建立岩石损伤方程和模型的常用参数有振幅分布、事件计数、振铃计数、能量等。

唐春安等^[2]通过用声发射振铃数建立了岩石材料损伤变量与声发射参数的关系:

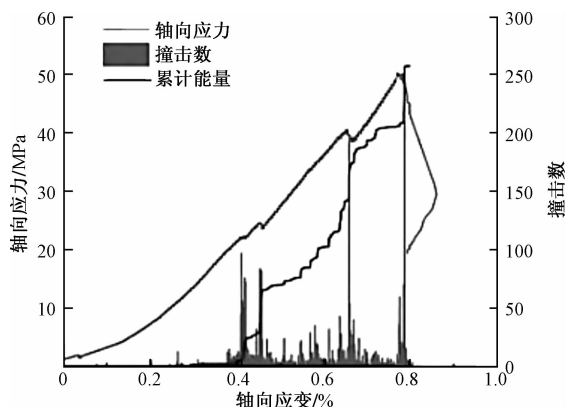


图 8 倾角为 45°试件的声发射响应规律^[12]

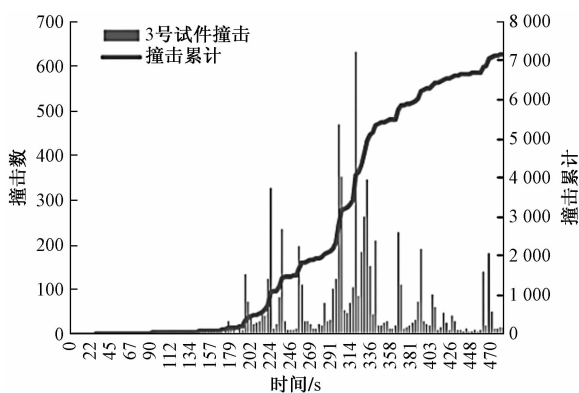


图 9 平行层理试件的声发射响应规律^[13]

$$D = \frac{C_d}{C_0} \quad (1)$$

式中: C_0 为无损试件截面上全部损伤破坏的累积声发射振铃计数; C_d 为断面损伤面积达到试件损伤面积时承载断面上微缺陷面积的累积声发射振铃计数。

刘保县等^[14]将损伤变量进行了修正与改进,定义为

$$D = D_u \frac{C_d}{C_0} \quad (2)$$

式中: D_u 为损伤临界值,为简化计算,取为 $D_u = 1 - \frac{\sigma_c}{\sigma_p}$; σ_c 为峰值强度; σ_p 为残余强度。

根据有效应力假设,可推出材料的一维损伤方程:

$$\sigma = \epsilon E (1 - D) \quad (3)$$

可建立基于声发射参数的岩石一维损伤理论方程,即

$$\sigma = \epsilon E (1 - D) = \left[1 - D_u \frac{C_d}{C_0} \right] \epsilon E \quad (4)$$

对图 6 所示的文献试验数据进行分析,将数据

代入式(4)中进行计算。计算曲线与试验曲线对比如图 10 所示。

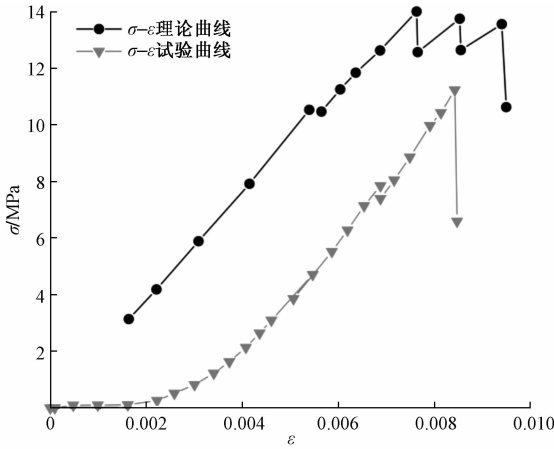


图 10 式(4)所得理论曲线与试验曲线对比

分析图 10 发现,采用声发射振铃计数建立的岩石损伤方程描述层状岩体的损伤破坏规律平均偏差率达到了 150.3%,可见该方程不适用于层状岩体损伤演化规律描述,需要建立新的损伤演化方程。

2.2 基于改进 Duncan 模型建立的层状岩体声发射损伤方程

2.2.1 改进 Duncan 模型简介

Duncan 模型是 Duncan 和 Chang 提出的^[15]岩土类材料的非线性弹性本构模型。Duncan 模型为

$$\sigma = \frac{\epsilon}{a + b\epsilon} \quad (5)$$

式中: σ 为 $\sigma_1 - \sigma_3$ 表示的主应力差; ϵ 为轴向应变; a, b 为与岩石相关的拟合参数。

形式简洁、可通过实验设定参数是 Duncan 模型的优点。1963 年,康得纳(Kondner)和柴拉斯高(Zelasko)曾指出,可以用双曲线方程来表示凝聚性土和非凝聚性土的应力-应变关系。但此时的模型只反映了岩石线性阶段和应变硬化阶段,并不能描述岩石类介质的初始压密阶段和残余强度阶段^[16]。

岩石的单轴损伤破坏并非是简单的线性关系,而是近似于二次函数的非线性关系,于是姜永东等^[17]在保留模型原有优点的基础上,通过加入二次项对模型进行改进,改进后的 Duncan 模型为

$$\sigma = \frac{\epsilon}{a + b\epsilon + c\epsilon^2} \quad (6)$$

$$\begin{cases} a = 1/E_0 \\ b = 1/\sigma_c - 2/\epsilon_c E_0 \\ c = 1/E_0 \epsilon_c^2 \end{cases} \quad (7)$$

式中: E_0 为岩石的初始弹性模量; σ_c 为峰值强度; ϵ_c 为峰值应变; a, b, c 与岩石相关的材料参数。

图 11 所示为改进前后的 Duncan 模型应力-应变关系曲线。

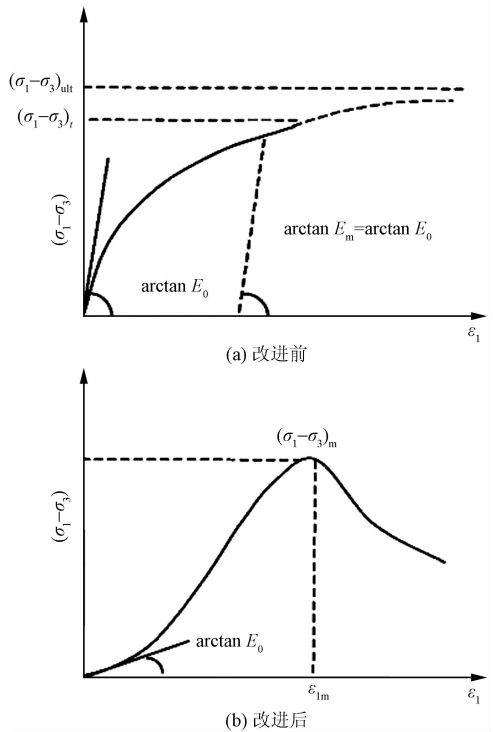


图 11 改进前后的 Duncan 模型应力-应变关系曲线^[18]

刘向峰等^[18]应用等效应力假设,把研究对象视为热力系统,在不考虑试件破坏后残余应力的条件下将岩石单轴压缩损伤模型表示为

$$\sigma' = \frac{\epsilon}{a + b\epsilon + c\epsilon^2} \varphi^m \quad (8)$$

式中: φ 为连续性因子; m 为材料常数。两者之间关系为

$$\varphi = 1 - D_n^{\frac{1}{n}} \quad (9)$$

式中: n 为材料常数。

联立以上 4 式即可建立基于声发射参数的岩体单轴损伤演化模型^[7]:

$$\sigma' = \frac{\epsilon}{a + b\epsilon + c\epsilon^2} \left\{ 1 - \left[\left(1 - \frac{\sigma_c}{\sigma_p} \right) \frac{C_d}{C_c} \right] \right\} \varphi^m \quad (10)$$

2.2.2 改进 Duncan 模型损伤方程对层状岩体损伤演化规律描述的适用性验证

将 1 号试件试验数据代入式(10)中进行计算,把计算结果与试验结果进行对比,结果如图 12 所示。

分析对比结果发现,层状岩体试件的理论值与试验值之间的平均偏差较小,平均偏差率大致控制

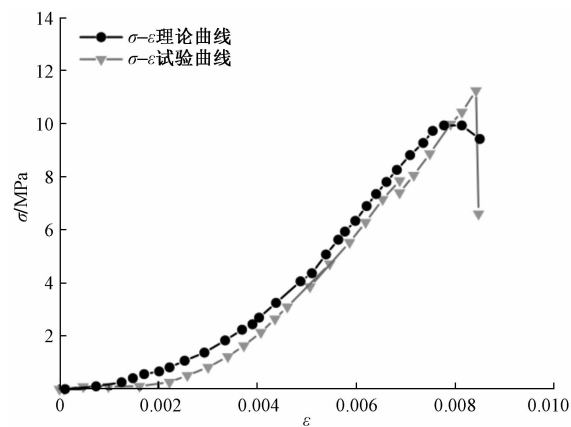


图 12 式(10)所得理论曲线与试验曲线

在 10% 以内。对比图 10 可得出初步结论:改进 Duncan 模型能更好地反映声发射参数与层状岩体损伤规律之间的关系,将改进 Duncan 模型构建的损伤方程用以描述层状岩体轴向荷载作用下损伤破坏的声发射响应规律是较为合适的。

3 层状岩体损伤演化有限元数值模拟

3.1 有限元模型

根据以上分析结果,采用有限元分析软件 ABAQUS 以图 2 所示的 1 号试件为原型进行建模,以文献试验数据开展有限元模拟,将模拟结果与理论结果进行综合比较分析。具体如下:

根据层理 1 号试件参数进行模型建立,层理倾角设置为 47°,模型为几何尺寸 $\phi 50\text{ mm}\times 100\text{ mm}$,不平行度小于 0.02 的标准试件。为保证与试验的受力条件一致,分别在模型上下表面设置刚性压板,压板尺寸为 $80\text{ mm}\times 80\text{ mm}\times 10\text{ mm}$ 。在载荷模块的边界条件单元中将下压板的边界条件设置为完全固定,设置一个参考点 RP-1 于上压板顶面,作为加载点,并将 RP-1 与上压板上表面的连接方式设置为耦合,使其自由度达到完全一致,以此实现对参考点 RP-1 施加荷载即等效于对整个上压板施加荷载。加载控制类型为位移控制,加载方式为单轴压缩,具体为在边界条件模块中设置向下的加载位移限值为 1 mm。模型荷载布置如图 13(a)所示。材料本构方程采用式(10)表示的基于声发射振铃计数建立的强度方程,其余弹性模量与泊松比等参数的设置均保持与文献试验一致。网格单元类型均采用 C3D8R 型,网格总数为 630 个,模型网格划分结果如图 13(b)所示。

通过有限元模拟分析,得到了 1 号模型试件的模拟数据。图 13(c)和图 13(d)分别表示试件的水

平位移云图和损伤区域云图。

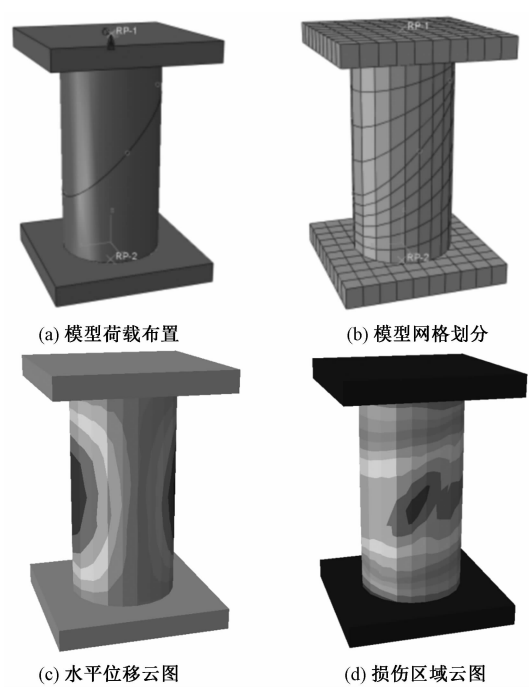


图 13 有限元分析结果

分析位移云图发现,试件的破坏呈现出岩石类材料在轴向压缩变形中的常见破坏形式——类“X”型破坏模式。试件在荷载作用下的位移首先于试件的层理位置附近产生,并随着荷载的持续施加逐渐向内部和四周扩散,最后交汇于模型质点处;而损伤区域云图显示,在加载过程中模型首先在层理位置的表面出现损伤,随着荷载的持续施加,表面损伤区域逐渐向模型两端扩展,随后模型内部的层理位置也开始出现损伤,并伴随荷载的施加而逐渐由内向外扩散,两方扩散区域最终相互贯通,形成损伤破坏带,模型的剪切滑移破坏也由此产生。对比试验分析发现,模拟结果与试验结果几乎一致,最大应力均分布于层理面附近,模型和试件均为从岩体的脆弱位置即层理位置开始出现损伤,最终产生沿层理构造的斜截面剪切滑移破坏。另一方面,模拟结果符合 1.2.1 节所阐述的层状岩体在轴向荷载作用下的破坏模式,当试件层理倾角处于 30°~60°时,试件平均应力值波动幅度最大,岩体破坏模式多为剪切滑移破坏,本文层理倾角为 47°的 1 号模型试件符合此规律。因此可以得出:有限元模拟分析较为合理,将改进 Duncan 模型构建的损伤方程作为层状岩体单轴压缩损伤破坏的有限元模拟本构方程也较为适宜。

3.2 有限元模拟分析

将有限元分析结果与试验结果以及理论结果应力-应变曲线共同绘制于图 14 中。

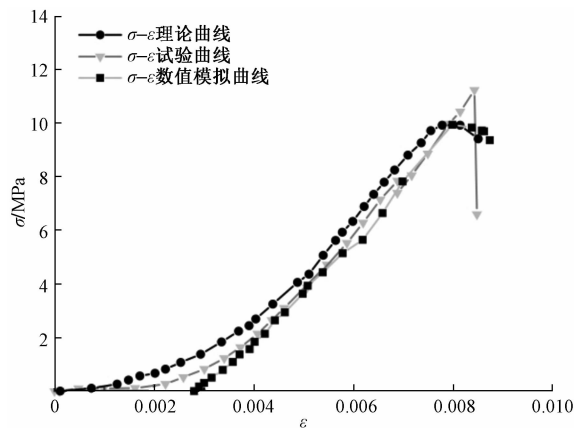


图 14 理论、试验、数值模拟曲线

因在材料属性模块中输入本构方程时 ABAQUS 默认只考虑材料的塑性损伤阶段,故模拟曲线直接从塑性阶段开始描绘。从图 14 中发现模拟曲线的塑损伤阶段与理论曲线的塑性损伤阶段呈现出较理想的拟合效果,二者走向与试验曲线走向包括峰值应力在内基本一致,有限元模拟曲线与试验曲线以及理论曲线拟合效果良好,说明了有限元分析的正确性,也论证了理论分析的正确性。综上所述,有限元分析进一步验证了改进 Duncan 模型构建的损伤方程的适宜性,表明将该理论模型应用于层状岩体损伤破坏的声发射响应规律的分析和研究是可行的。

4 结论

本文首先通过对几个层状岩体单轴压缩声发射试验进行分析和总结,给出层状岩体单轴压缩损伤破坏的共性规律,继而对基于声发射振铃计数和改进 Duncan 模型构建的新模型进行计算对比分析,研究模型的合理性,最后根据研究结论开展有限元模拟分析,得到如下结论:

- 1)层状岩体的层理结构对岩体的变形破坏模式存在较大影响,带倾角层状岩体的破坏模式多为沿着层理倾角方向和位置发生剪切破坏,其中倾角处于 30°~60°时平均应力值波动幅度最大,岩体多发生沿层理面的剪切滑移破坏,在岩质边坡防治中应重点关注发育此类倾角的层状岩体。
- 2)通过 3 个声发射试验分析,总结出层状岩体在轴向荷载作用下的损伤破坏阶段大致可分为压密阶段、弹性至弹塑性变形阶段和塑性变形阶段,声发射信号伴随该 3 阶段体现出良好的同步响应规

律,响应规律可根据损伤破坏的 3 阶段按时间划分为平静期、活跃期和剧烈期,表明采用该声发射参数描述层状岩体在轴向荷载作用下的损伤破坏规律较为适宜。

3)通过理论研究,对改进 Duncan 模型建立的新损伤模型进行了分析论证。研究表明该模型适用于层状岩体在轴向荷载作用下损伤破坏规律的分析与计算,并通过有限元模拟进一步验证了此结论,对基于声发射的层状岩体损伤本构模型研究进行了有效补充。

参考文献

[1] 刘建锋. 岩石声发射研究现状[J]. 四川师范大学学报(自然科学版), 2021, 44(5): 569-575, 566.

[2] 唐春安, 徐小荷. 缺陷的演化繁衍与 Kaiser 效应函数[J]. 地震研究, 1990(2): 203-213.

[3] 刘运思, 王世鸣, 颜世军, 等. 基于声发射实验层状砂岩力学特性及破坏机理[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2019, 50(6): 1419-1427.

[4] 牟宏伟, 何学秋, 宋大钊, 等. 不同节理夹角煤单轴压缩力学和声发射响应及影响机制[J]. 煤炭学报, 2020, 45(5): 1726-1732.

[5] 王守光, 刘耀儒, 陈新, 等. 基于声发射技术的含裂纹石膏试件破坏分析[J]. 水力发电学报, 2019, 38(7): 110-120.

[6] 赵小平, 陈淑芬. 基于声发射振幅分布的裂隙岩体破坏演化过程[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(S1): 3012-3017.

[7] 张东明, 白鑫, 尹光志, 等. 含层理岩石单轴损伤破坏声发射参数及能量耗散规律[J]. 煤炭学报, 2018, 43(3): 646-656.

[8] HU X, GONG X, HU H, et al. Cracking behavior and acoustic emission characteristics of heterogeneous granite with double pre-existing filled flaws and a circular hole under uniaxial compression: Insights from grain-based discrete element method modeling[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2022, 81(4): 1-24.

[9] WU P, CHEN L, CHEN Y, et al. Experimental Study on mechanical properties and microcrack fracture of coal specimens under the coupling of loading rate and compression-shear loads[J]. International Journal of Geomechanics, 2022, 22(4): 04022028.

[10] NIU Y, ZHOU X P. Forecast of time-of-instability in rocks under complex stress conditions using spatial precursory AE response rate[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2021, 147: 104908.

[11] 史越, 傅鹤林, 伍毅敏, 等. 层状岩石单轴压缩损伤本构模型研究[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2020, 48(9): 126-132.

[12] 丁恒, 刘兵. 层状灰岩各向异性力学特征及声发射演化试验分析[J]. 科技和产业, 2021, 21(8): 339-344.

[13] 姚欢迎,陈军斌,聂向荣,等.单轴压缩声发射试验的页岩损伤演化规律[J].科学技术与工程,2020,20(4):1581-1586.

[14] 刘保县,黄敬林,王泽云,等.单轴压缩煤岩损伤演化及声发射特性研究[J].岩石力学与工程学报,2009,28(S1):3234-3238.

[15] DUNCAN J M,CHANG C Y. Nonlinear analysis of stress and strain in soils[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division,1970,96(5):1629-1653.

[16] 冯卫星,常绍东,胡万毅.北京细砂土邓肯-张模型参数试验研究[J].岩石力学与工程学报,1999,28(3):327-330.

[17] 姜永东,鲜学福,栗健.单一岩石变形特性及本构关系的研究[J].岩土力学,2005,26(6):941-945.

[18] 刘向峰,汪有刚.声发射能量累积与煤岩损伤演化关系初探[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2011,30(1):1-4.

[19] 付鹏,亓宪寅,王胜伟,等.基于声发射的层状复合岩石损伤演化规律实验研究[J].科学技术与工程,2022,22(19):8431-8438.

[20] 林浩,刘建锋,徐邓,等.盐穴储气库三种典型岩石拉伸声发射特征研究[J].科学技术与工程,2022,22(16):6635-6641.

[21] 王晓雨,李骞,王伟,等.动静组合加载数值模拟砂岩损伤演化规律[J].科学技术与工程,2022,22(15):6248-6254.

[22] 张志婷,潘元贵,蒋炳,等.开放性裂隙岩石三轴加载破坏前兆信息[J].科学技术与工程,2021,21(6):2202-2209.

Damage Law Analysis of Layered Rock Mass Based on Uniaxial
Compression Acoustic Emission Test

LI Honggang

(State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection,
Chengdu University of Technology,Chengdu 610059,China)

Abstract: The damage and failure law of layered rock mass is one of the important problems in geotechnical engineering. The experimental analysis, theoretical research and numerical simulation of the existing uniaxial compression acoustic emission test results are conducted with the bedding incline rock mass as the research object. The results show that the bedding structure has a significant influence on the failure mode of rock mass. It is effective to describe the damage and failure law of layered rock mass under axial load by using acoustic emission signal response characteristics. The new damage model based on the improved Duncan model is suitable for the damage evolution analysis of layered rock mass under axial load, and the model is further verified by finite element numerical simulation. The research results can provide theoretical reference and technical support for the subsequent research on the damage law of layered rock mass.

Keywords: layered rock mass; acoustic emission; Duncan model; numerical simulation