

DOI: 10.11779/CJGE201609004

基于地应力场加卸载的地下洞室稳定数值模拟研究

祝方才, 余继江, 刘丙肖, 李大建, 王勤富

(湖南工业大学土木工程学院, 湖南 株洲 412007)

摘 要: 将地下洞室稳定问题看作一非线性系统, 研究了加卸载响应比 (LURR) 理论在洞室稳定分析中的应用前景及其实现途径, 提出了基于地应力加卸载的实现方法。利用 RFPA2D Basic 软件, 结合模型试验建立了平面应变数值模型, 研究了加卸载实现方法, 以拱顶沉降、水平收敛和声发射作为 LURR 参数, 分析了逐级加卸载下变化特征。研究表明, 拱顶沉降和收敛在荷载不太大的情况下, 围岩处于稳定状态, LURR 基本在 1 左右变化, 当洞室围岩接近破坏时, 拱顶沉降和水平收敛的 LURR 值出现震荡, 不同位置处的水平收敛 LURR 呈现不同幅度的震荡。声发射随着荷载的增大而增加, 加载声发射事件数和能量一般大于卸载情况, 但未出现明显的加卸载响应。相关参数的 LURR 特征可用于预测洞室渐进失稳。

关键词: 地应力场; 洞室稳定; 加卸载响应比; 拱顶沉降; 水平收敛; 声发射

中图分类号: TU431; O319.56

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2016)09-1578-08

作者简介: 祝方才 (1972 -), 男, 博士, 教授, 主要从事洞室工程和边坡稳定的教学与研究。E-mail: zhufangcai@163.com。

Numerical analysis of stability of underground openings through loading/unloading of in-situ stress fields

ZHU Fang-cai, YU Ji-jiang, LIU Bing-xiao, LI Da-jian, WANG Qin-fu

(College of Civil Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou 412007, China)

Abstract: By treating the stability of underground openings as a nonlinear system, application of loading/unloading response ratio (LURR) theory is studied, and a new loading/unloading approach is put forward through increase/reduction of in-situ stress fields. Based on the RFPA2D Basic software and physical model tests, a plane strain numerical model is established to study mechanical behavior under multistage loading/unloading, and three response parameters including crown subsidence, horizontal convergence and acoustic emission are studied. The numerical results show that LURRs of these parameters float around 1.0 under not too large load, and the surrounding rocks are stable. With the increase of load, LURRs of crown subsidence and horizontal convergence increase slowly. While the surrounding rocks are close to failure, LURRs present acute fluctuation. It should be noted that LURRs of horizontal convergence at different locations don't present the same fluctuation amplitude. The acoustic emission doesn't mean that the distinct change of LURR is close to failure. However, it can indicate the damage evolution of the surrounding rocks. The above-mentioned achievements can be utilized in prediction of progressive instability.

Key words: in-situ stress field; stability of underground opening; loading/unloading response ratio; crown subsidence; horizontal convergence; acoustic emission

0 引 言

随着水利水电、交通运输和矿山生产的进行, 洞室稳定逐渐引起重视。洞室稳定的新研究方法和概念逐步提出, 如塑性区体积、破坏接近度指数、强度折减法、熵等理论和方法逐步得到应用。地下洞室 (以下简称洞室) 围岩失稳常常伴随着变形的非均匀性、非连续性以及大位移等特点, 是复杂的非线性力学问题^[1], 近年来, 国内外许多学者对地下洞室的稳定性做了大量的研究, 但是在评价围岩稳定性方面还没有

统一的理论, 大多数仍停留在定性或经验水平^[2], 如何定量的评判地下洞室的稳定性有待进一步研究。

1 加卸载效应及在地下洞室稳定分析应用分析

尹祥础等 1984 年^[3-4]提出了加卸载响应比 (load

基金项目: 湖南省自然科学基金重点项目 (13JJ2033)

收稿日期: 2015-07-04

unload response ratio, 以下简称 LURR) 理论, 是一种用于研究非线性系统失稳前兆和失稳预报的新理论。其基本原理如图 1 所示, 利用材料在载荷作用下其响应(变形)与载荷增幅之比在加载和卸载情况下表现不同, 特别是在接近临界稳定时, 加载响应比大于卸载响应比的这一特性, 已成功运用于地震预报^[4-7]、矿山微震分析、材料破坏中, 并应用于房屋结构整体稳定^[8]、边坡稳定分析的研究。

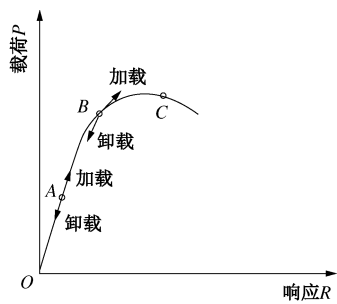


图 1 加卸载响应比原理
Fig. 1 Mechanism of LURR

在边坡工程中, 胡军等^[9]将 LURR 引入到边坡爆破动力稳定性分析中, 建立了边坡在爆破荷载作用下的 LURR 模型。汤罗圣等^[10]以水库的水位作为加载和卸载参数, 以滑库的加速度作为响应量, 建立了加卸载响应模型。贺可强等^[11]、邬凯等^[12]以降雨作为边坡加卸载, 把 LURR 运用到降雨型边坡稳定性预测中。在洞室开挖过程中, 洞室围岩应力得到释放, 围岩应力发生重分布。以静水压力状态下的深埋圆形洞室为例, 设地应力为 p_0 , 在洞室表面, 径向应力 $\sigma_r = 0$, 而切向应力, 按照加卸载准则^[13], 属于加载, 与传统意义上的开挖导致应力释放似乎存在一定矛盾, 其原因是后者指的是某方向上的应力释放。对于不规则洞室和非均匀地应力场的情况, 上述分析更为复杂, 从而可认为基于开挖(充填)简单判别加卸载难以实现。鉴于洞室应力分布的复杂性, 要实现加卸载, 应利用整体条件, 使得加卸载既要方便输入, 又要反映其加载卸载特征。为此可通过两种方案实现, 一是将洞室所处的工程岩土体整体施加一个扰动(如地震波), 另一种是通过改变边界条件(实质上是改变地应力场)进行加卸载, 边界条件包括位移和地应力边界条件, 对于洞室工程来说, 后一种边界较为切合实际, 本文结合室内模型试验, 在此基础上利用 RFPA2D Basic 软件进行数值模拟。

2 数值计算模型

2.1 工程背景及物理模型试验

某大型深埋铜金属矿山, -730 水平运输巷道断面

尺寸高×宽=4.5 m×4.5 m, 矿柱回采过程会对该巷道会产生多次扰动, 需要对其进行稳定分析。为此建立了室内物理试验相似材料平面应变模型^[14], 采用重度相似比 $C_\gamma=2$, 几何相似比 $C_L=25$, 具体尺寸如如图 2 所示。相似材料配比为石膏: 砂: 水泥: 水=0.7: 4: 0.4: 1.0。通过同步多点加载系统在模型顶部施加逐级循环荷载, 通过边界荷载的加卸载实现对地应力场的加卸载, 从而避开了洞室围岩应力场的加卸载实现的困难。在拱顶和边墙分别布置了位移计、百分表和土压力盒, 在模型箱表面布置了 8 个声发射探头, 以检测试验过程中的声发射。具体布置如图 3 所示。

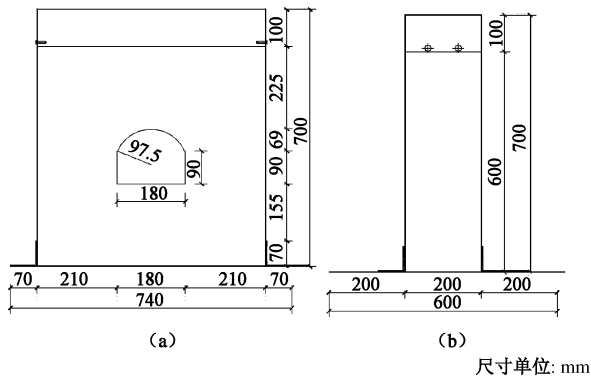


图 2 物理模型箱尺寸
Fig. 2 Dimensions of model box

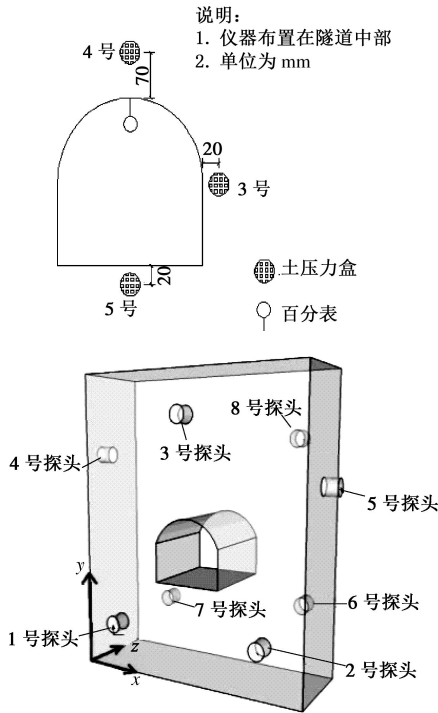


图 3 测试元件布置
Fig. 3 Arrangement of measuring apparatus

2.2 数值模型

在模型试验基础上建立了数值试验模型, 如图 4 所示。基于模型试件建立二维平面应变模型, 数值计

算模型的几何尺寸及形状严格遵循物理模型，模型宽度为 0.62 m，模型高度为 0.71 m，建立网格为 124×142=17608 个网格，每个网格的尺寸为 5 mm。用任意荷载命令，施加左侧边界和右侧边界 X 方向和底部边界 Y 方向的位移固定边界条件；模型顶部网格， X 方向为自由边界， Y 方向施加竖直方向的应力。关于洞室目前模型试验开洞方式主要有“先加载后开洞”和“先开洞后加载”两种开挖方式，在模型试验中采用前一种方式，顶部预加载 5 kN 约 40 kPa 的荷载，在数值计算中为建模方便，采用后一种方式，即先开挖后加载方式。由于荷载较小，可忽略两种方式的影响。

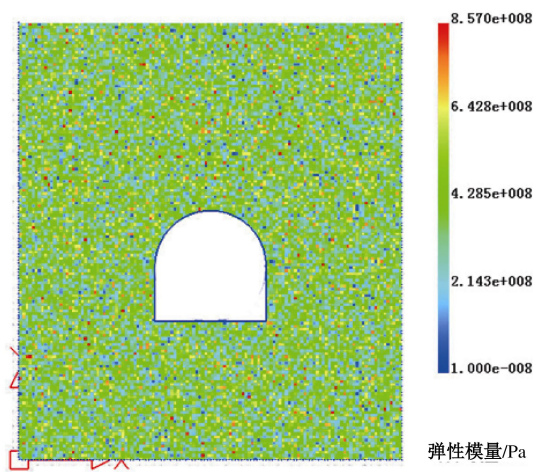


图 4 数值计算网格

Fig. 4 Numerical grid

均匀度系数 m 是计算参数中的关键参数， m 值不同，岩石的峰值强度及其对应的应变均有所不同。唐春安等^[15]推导了基元强度为 Weibull 时岩石的应力应变关系：

$$\sigma = E\varepsilon \cdot e^{-\left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}\right)^m} \quad (1)$$

式中 E 为岩石介质的弹性模量； ε_0 为材料特性参数； m 为均匀度系数。

若令 $\sigma_0 = E\varepsilon_0$ ，则可以将损伤本构模型表示为无量纲形式

$$\hat{\sigma} = \hat{\varepsilon} e^{-\hat{\varepsilon}^m} \quad (2)$$

式中， $\sigma_0 = \sigma / E\varepsilon_0$ ， $\hat{\varepsilon} = \varepsilon / \varepsilon_0$ 。

损伤本构方程中的参数 m ， ε_0 可由全程应力应变曲线的峰值点 $C(\sigma_c, \varepsilon_c)$ 来确定，可以得到^[15]

$$\left. \begin{aligned} m &= \left[\ln \frac{E\varepsilon_c}{\sigma_c} \right]^{-1} \\ \varepsilon_0 &= \varepsilon_c \left[\ln \frac{E\varepsilon_c}{\sigma_c} \right]^{-\frac{1}{m}} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

结合物理模型相似材料的应力应变曲线，根据公式 (3) 可推出 m 值为 3，理论曲线与试验曲线见图 5。结合前人的研究成果^[16-17]，确定数值计算模型力学参数见表 1。

表 1 模型试件力学计算参数

Table 1 Mechanical parameters of model specimen

均质度 /m	弹性模量 /MPa	摩擦角 /(°)	抗压强度均 值/MPa	密度 /(kg·m ⁻³)	泊松比
3	450	40	2.1	1350	0.26

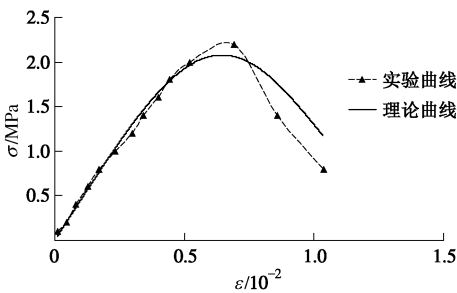


图 5 试块应力应变曲线

Fig. 5 Stress-strain curves of test specimen

RFPA2D Basic 软件可通过任意加载实现对边界荷载进行加载和卸载，用求解控制器来控制实际的加载和卸载步数，设置步数不小于整个加卸载过程所需的总步数，加载取正值，卸载取负值。通过这种方式改变边界条件，实现地应力场的加卸载，直至巷道失稳，加卸载步数与荷载的对应关系见表 2。

表 2 加载步数与荷载的关系

Table 2 Relationship between loading step and stress

顺序	荷载步数	荷载值/MPa
1	10-18-22	0.042-0.0756-0.0588
2	22-32-40	0.0588-0.1092-0.0756
3	40-52-60	0.0756-0.126-0.0924
4	60-72-80	0.0924-0.1428-0.1092
5	80-92-100	0.1092-0.1596-0.126
6	100-112-120	0.1260-0.1764-0.1596
7	120-132-140	0.1596-0.21-0.1764
8	140-152-160	0.1764-0.2268-0.1932
9	160-172-180	0.1932-0.2436-0.21
10	180-192-200	0.21-0.2604-0.2268
11	200-212-220	0.2268-0.2772-0.2436
12	220-232-240	0.2436-0.294-0.2604
13	240-252-260	0.2604-0.3108-0.2772
14	260-272-280	0.2772-0.3276-0.294
15	280-292-300	0.294-0.3444-0.3108
16	300-312-320	0.3108-0.3612-0.3276
17	320-332-340	0.3276-0.378-0.3444
18	340-352-360	0.3444-0.3984-0.3612
19	360-372-380	0.3612-0.4116-0.378
20	380-392-400	0.378-0.4284-0.3948
21	400-412-420	0.3948-0.4452-0.4116
22	420-432-440	0.4116-0.462-0.4284
23	440-452-460	0.4284-0.4788-0.4452
24	460-472-480	0.4452-0.4956-0.462
25	480-492-500	0.462-0.5124-0.4788
26	500-512-520	0.4788-0.5292-0.4956

3 数值计算结果分析

3.1 拱顶沉降响应特征分析

在洞室稳定性判断中,拱顶沉降是一个重要指标。当拱顶沉降达到某一值或速率过大或出现加速的情况,则预示着洞室失稳。加卸载响应比理论认为,当加载和卸载的洞室拱顶沉降比值超过一定值时,预示着洞室失稳。数值模拟结果具体如图6所示。

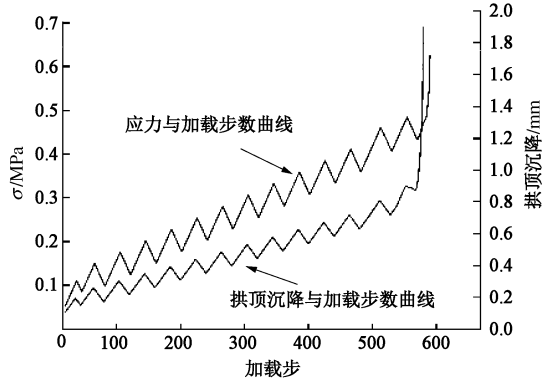


图6 加载步与应力和拱顶沉降的关系

Fig. 6 Relationship among loading step, stress and vault settlement

随着地应力的增大和减少,拱顶沉降出现了明显的响应特征。把一次加载过程和卸载过程称为一级荷载,每一级加载曲线和卸载曲线的转折点称为加卸载点,为得到拱顶沉降的响应特征,重点研究此加卸载点的前一步和后一步的荷载位移曲线,图7列出了具有代表性的加卸载曲线。

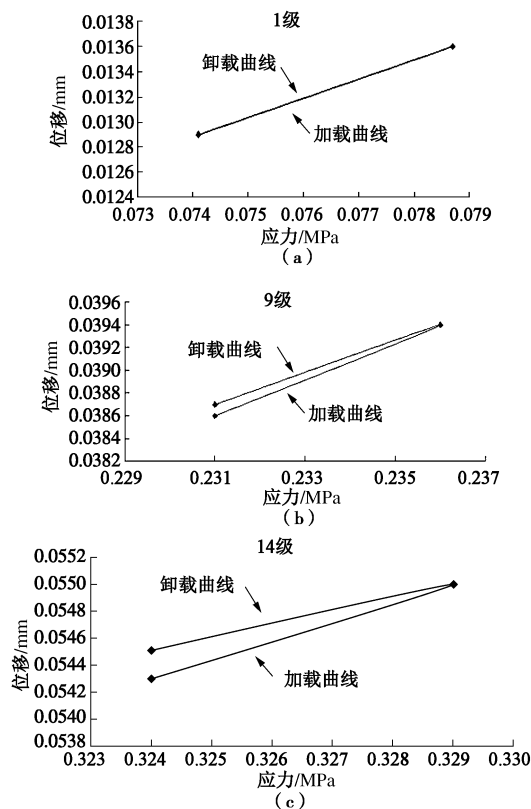


图7 分级加卸载过程中拱顶沉降

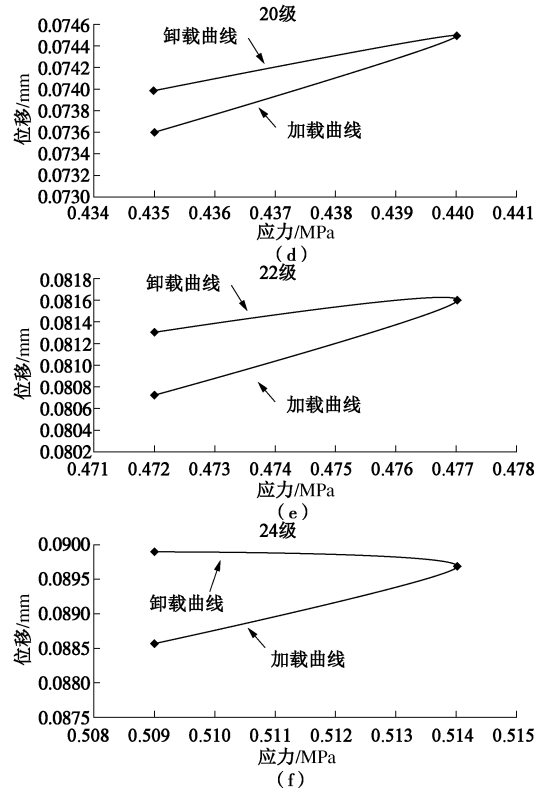


Fig. 7 Vault settlements during loading and unloading

由图7可知,在荷载较低时,加载曲线与卸载曲线几乎是重合的,说明此时围岩处于弹性变形阶段;随着荷载水平的不断提高,加载曲线与卸载曲线逐渐分离,在第24级荷载卸载过程中,拱顶沉降基本保持不变,此时围岩进入了塑性状态。根据加卸载响应比定义求出加卸载响应比如图8所示。

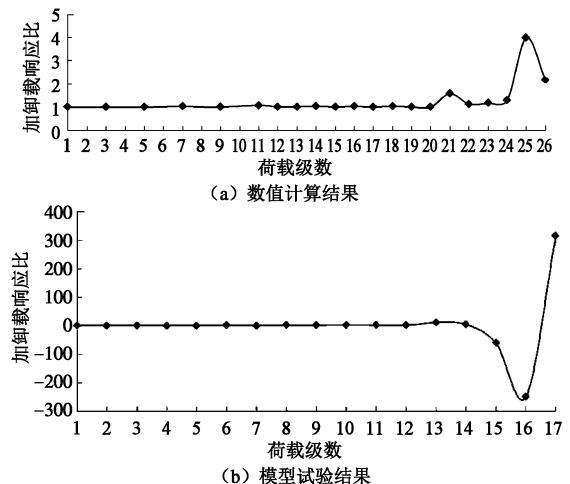


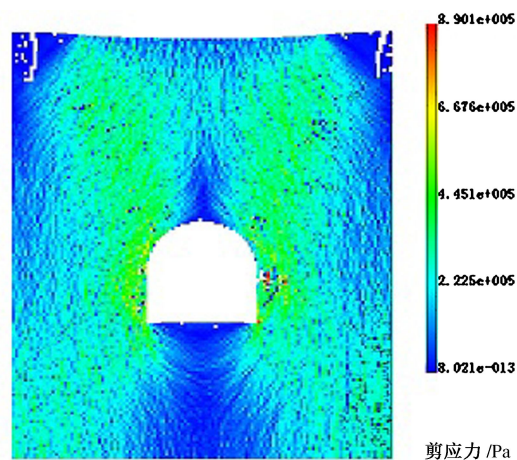
图8 拱顶沉降加卸载响应比曲线

Fig. 8 LURRs of vault subsidence

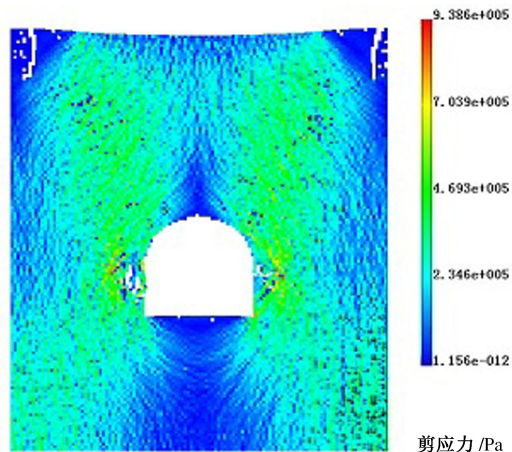
由图8(a)可知,在加卸载初期,加卸载响应比值较为平稳,一直保持在1.0左右,在第21级荷载时,加卸载响应比有明显增大,模型试验结果与数值模拟相比,其震荡幅度更大,可能的原因是模型试验中其上边界荷载不是完全的均布荷载,且模型制作过程中

可能存在不均质的问题,拱顶破坏更早出现。对照图 9 (a) 数值模型网格破坏较多,第 25 级荷载时,加卸载响应比值达到最大值,此时由图 9 (b) 可以看出,此时洞壁部分围岩出现了较大的破坏。在第 26 级逐级加卸载过程中,响应比值迅速回落,洞壁处网格进一步向深处破坏。第 26 级荷载结束后,模型网格产生较大的破坏,沿拱肩约 45° 方向出现了明显的破裂面,破裂形式与模型试验中大体吻合,此时洞室整体失稳,在进行物理模型试验时,当顶部荷载达到 0.3 MPa 时(即在 14 级荷载时),左侧边墙出现半贯通裂缝,物理模型加载系统和洞壁裂缝如图 9 (e) 所示,随着荷载增加,到第 16 级时,裂缝进一步扩展,洞室整体破坏。

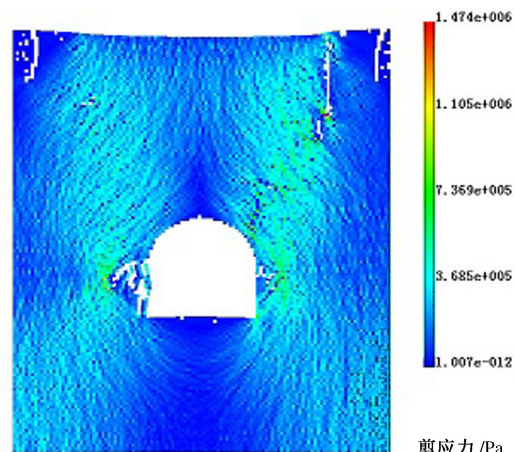
在室内物理模型试验中,当荷载峰值达到 0.35 MPa 时,裂缝继续扩展,隧道洞壁出现较为明显的破坏,数值试验相对来说破坏荷载高一些,为 0.52 MPa 左右,可能的原因分析如下:物理模型试验中的模型顶面荷载是通过圆柱体垫板传递到 1 cm 厚钢板,再通过下面敷设的 3 cm 砂垫层传递到模型顶部,其顶部荷载是非均匀的,类似刚性板下部软硬地层的荷载传递问题,不是完全的均布荷载问题,与数值模型中的顶部均布荷载不同,且物理模型实际上为空间模型,而数值模型采用的是平面应变模型,以上因素导致物理模型结果偏小。



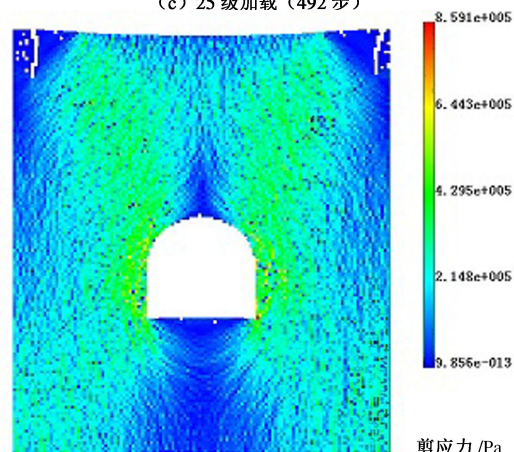
(a) 18 级加载 (352 步)



(b) 21 级加载 (412 步)



(c) 25 级加载 (492 步)



(d) 26 级卸载 (512 步)



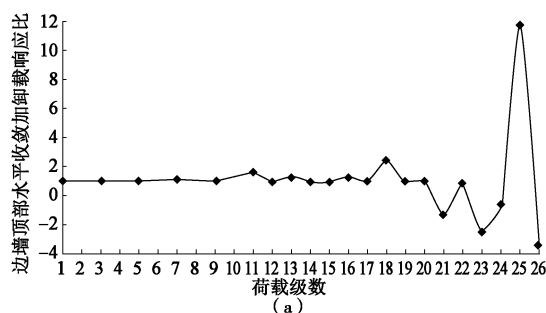
(e) 物理模型试验洞室加载系统和围岩裂缝

图 9 数值模型和物理模型破坏图

Fig. 9 Failure of numerical model and physical model

3.2 洞室边墙水平收敛分析

洞室收敛是反映洞室稳定的另一个重要参数。分别选取左右边墙顶部和中部研究收敛的加卸载响应比,如图 10 所示。



(a)

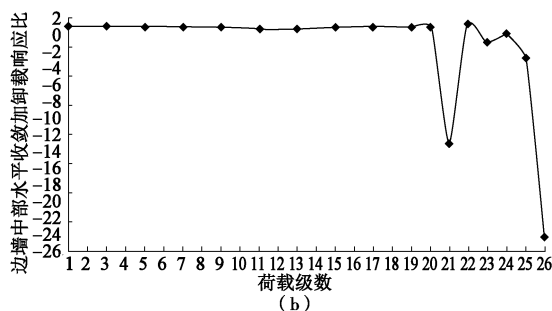


图 10 洞室边墙水平收敛和加载级数的关系

Fig. 10 Relationship between loading step and horizontal convergence

水平收敛的加卸载响应比在荷载较低时基本在 1 左右,说明围岩基本处于弹性状态,随着荷载逐步增加,特别是当洞室围岩出现破裂区时,加卸载响应比出现一个震荡的过程。对于墙顶水平收敛,该震荡在 17 级左右出现,而对于边墙中部则在 19 级左右出现,在 20 级左右均出现较大的震荡,在 26 级则急剧增加,此时围岩出现明显的破坏。值得注意的是,当荷载较大时,加卸载响应比出现负值,即卸载时围岩收敛值也会增加。从加卸载响应比值来看,围岩破坏时,边墙中部较顶部较大,可从一定程度上说明其更能反映围岩破坏情况,这一点可由图 9 (d) 及模型试验结果中看出。

3.3 声发射特性

加卸载过程中洞室从初始稳定到失稳,由于围岩破坏将产生声发射,可通过该参数反映洞室稳定程度,加卸载过程中声发射情况如图 11, 12 所示。

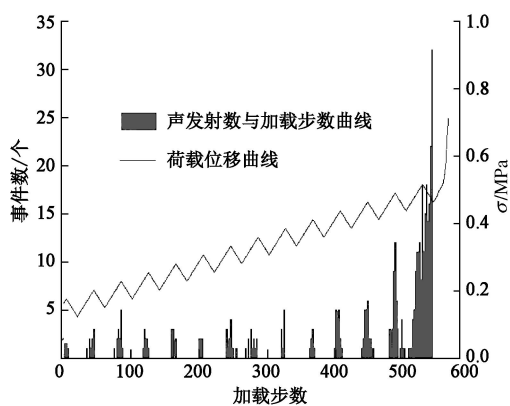


图 11 加载步与应力和事件数的关系

Fig. 11 Relationship among loading step, stress and AE event

分析图 11, 12 发现,在加载初期事件数和能量数都较小,在后期围岩破坏阶段,两者增幅较大。分析图 9 可以得出,只有当应力超过上一过程中的应力时,才会产生声发射,即 Kaiser 效应^[18],几级荷载后,在荷载未达到上一级最大荷载前,也产生了声发射,属于 Felicity 效应^[19]。进一步分析图 9,声发射数在 25 级荷载加载过程有较大幅度增加,值得注意的是,结

合图 7 发现,拱顶沉降响应比值也在此时突然增大。由此可知,加卸载响应比值可较好的反映试件的损伤演化过程。

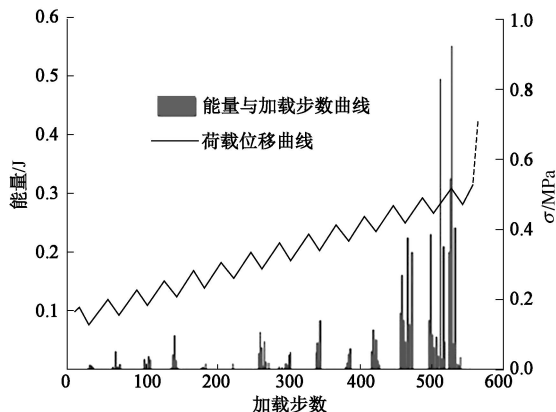


图 12 加载步与应力和能量的关系

Fig. 12 Relationship among loading step, stress and AE energy

由表 3 可知,加载阶段和卸载阶段都会产生声发射,尤其是在后期,由加载和卸载导致的声发射数都较多。这种现象产生的原因可能是因为试件内部非均匀特征,在受到压应力时,会在局部产生应力集中和塑性变形,在卸载阶段产生残余拉应力,当压应力足够大时,残余应力值超过材料微元的抗拉强度,从而使试件产生裂纹和损伤。由此知,不能简单以加卸载过程中产生的事件数来求解响应比值。

表 3 每级荷载加载和卸载过程中声发射特征

Table 3 AE features of loading and unloading process of each

荷载级数	加载		卸载	
	事件数	能量/J	事件数	能量/J
1	0	0.00	0	0.00
3	0	0.00	0	0.00
5	1	0.39	0	0.00
7	2	0.56	0	0.00
9	2	0.54	0	0.00
11	2	7.23	1	0.37
13	3	1.04	1	0.19
15	1	0.27	0	0.00
17	0	0.00	0	0.00
19	1	0.92	0	0.00
20	0	0.00	0	0.00
21	8	2.76	3	6.78
22	4	3.39	3	7.11
23	7	7.60	3	3.23
24	3	7.19	30	23.20
25	62	34.56	11	3.76
26	5	15.05	18	30.71

3.4 洞室稳定性判别

洞室失稳包括局部失稳和整体失稳两种模式,首先是局部失稳^[20],发展到一定程度后整体失稳。隧道稳定分析规范^[21]认为,当围岩处于弹性阶段,或在拱圈和两侧边墙部位出现的塑性区互不连通的弹塑性变形状态,则围岩可起承载环的作用,围岩尚未整体失

稳。加卸载响应比理论认为,当围岩进入破坏状态后,破坏部分的响应比将会增加^[22],增加到某一程度时,围岩整体失稳。根据数值模拟结果,当洞室围岩发生破坏时,加卸载响应比显著增加,且出现震荡情况,当荷载达到某一值时,这种震荡效应更加明显,表明该处围岩已经破坏,进而导致洞室整体破坏,这需要结合围岩破损区是否贯通来综合分析,在试验研究和工程实践中,可通过声发射等方法实现。

4 结 论

(1) 基于模型试验,利用 RFPA 2D Basic 软件,通过对边界荷载加卸载实现对地应力场加卸载,避开了洞室复杂应力条件下的加卸载难以定义问题,是一种能直观实现的加卸载措施。

(2) 拱顶沉降和边墙水平收敛能较好地反映洞顶围岩稳定发展情况,接近破坏时, LURR 值会大幅增加,并出现剧烈波动,边墙顶部和中部水平收敛震荡幅值不同,似乎后者更能预警洞室失稳。拱顶沉降数值结果与模型试验进行了对比分析,呈现较好的一致性。

(3) 声发射事件数和能量未呈现出显著的加卸载响应比特征,但其累积数和累积能量能反映损伤发展情况。

(4) 加卸载响应比值达到某一程度后,围岩局部破坏,整体破坏应结合声发射等方法综合分析。

参考文献:

- [1] 王东林. 基于安全系数法的地下洞室围岩稳定评价方法研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2012. (WANG Dong-lin. Study of safety evaluation method of the surrounding rocks of underground cavern based on safety coefficient method[D]. Yangling: North West Agriculture and Forestry University, 2012. (in Chinese))
- [2] 秦玉红. 地下洞室围岩稳定性方法的研究现状[J]. 现代矿业, 2009(5): 24 - 27. (QIN Yu-hong. Analytic method actualities of surrounding rock stability of underground chamber[J]. Modern Mining, 2009(5): 24 - 27. (in Chinese))
- [3] 尹祥础, 张浪平, 张晖辉, 等. 加卸载响应比 20 年及其展望[J]. 国际地震动态, 2008(4): 1 - 17. (YIN Xiang-chu, ZHANG Lang-ping, ZHANG Hui-hui, et al. The LURR 20 years and prospect[J]. Recent Developments in World Seismology, 2008(4): 1 - 17. (in Chinese))
- [4] 尹祥础. 加卸载响应比理论及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2015. (YIN Xiang-chu. Load/unload response ratio theory and its application[M]. Beijing: Science Press, 2015. (in Chinese))
- [5] 尹祥础, 陈学忠, 宋治平. 加卸载响应比——一种新的地震预报方法[J]. 地球物理学报, 1994, 37(6): 767 - 775. (YIN Xiang-chu, CHEN Xue-zhong, SONG Zhi-ping. The load-unload response ratio theory: A new approach to earthquake prediction[J]. ACTA Geophysica Sinica, 1994, 37(6): 767 - 775. (in Chinese))
- [6] YIN Xiang-chu, CHEN Xue-zhong, SONG Zhi-ping. The load/unload response ratio(LURR) theory and its application to earthquake prediction[J]. Journal of Earthquake Predication Research, 1994, 3(3): 325 - 333.
- [7] YIN Xiang-chu, CHEN Xue-zhong, SONG Zhi-ping. A new approach to earthquake prediction-the load/unload response ratio(LURR) theory[J]. Pure and Applied Geophysics, 1995, 145(3/4): 701 - 715.
- [8] 张浪平, 尹祥础, 梁乃刚. 加卸载响应比与损伤变量关系研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(9): 1874 - 1882. (ZHANG Lang-ping, YIN Xiang-chu, LIANG Nai-gang. Study on relation between load/unload response ratio and damage variable[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(9): 1874 - 1882. (in Chinese))
- [9] 胡 军, 刘兴宗. 基于加卸载响应比理论的爆破动力露天矿边坡稳定性分析[J]. 采矿与安全工程学报, 2012, 29(6): 882 - 887. (HU Jun, LIU Xing-zong. Stability analysis of open pit slope influenced by blasting dynamics based on theory of Load-Unload Response Ratio[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2012, 29(6): 882 - 887. (in Chinese))
- [10] 汤罗圣, 殷坤龙. 加卸载响应比理论在水库型滑坡时间预测预报中的应用研究[J]. 水文地质工程, 2012, 39(6): 93 - 96. (TANG Luo-sheng, YIN Kun-long. Research on the application of load-unload response ratio theory on time prediction of reservoir-type landslides[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2012, 39(6): 93 - 96. (in Chinese))
- [11] 贺可强, 周墩云, 王思敬. 降雨型堆积层滑坡的加卸载响应比特征及其预测作用与意义[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(16): 2665 - 2670. (HE Ke-qiang, ZHOU Dun-yun, WANG Si-jing. Features of load-unload response ratio and its significance in predication of colluvial landslide induced by rainfall[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(16): 2665 - 2670. (in Chinese))
- [12] 郭 凯, 盛 谦, 张勇慧. 基于加卸载响应比理论的降雨型滑坡预警研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2011, 31(6): 632 - 636. (WU Kai, SHENG Qian, ZHANG Yong-hui. Research on early warning of rainfall-induced landslides based on

- load-unload response ratio theory[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2011, **31**(6): 632 - 636. (in Chinese))
- [13] 郑颖人, 沈珠江, 龚晓南. 岩土塑性力学原理[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002: 144 - 149. (ZHENG Ying-ren, SHEN Zhu-jiang, GONG Xiao-nan. Principle of plastic mechanics for rock and soil[M]. Beijing: China Building Industry Press, 2002: 144 - 149. (in Chinese))
- [14] 刘丙肖. 基于地应力场加卸载的地下洞室稳定分析[D]. 株洲: 湖南工业大学, 2015. (LIU Bing-xiao. Stability analysis of underground cavern based on load/unload of in-situ stress field[D]. Zhuzhou: Hunan University of Technology, 2015. (in Chinese))
- [15] 唐春安, 王述红, 傅宇方. 岩石破裂过程数值试验[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 42 - 45. (TANG Chun-an, WANG Shu-hong, FU Yu-fang. Numerical test of rock failure[M]. Beijing: Science Press, 2003: 42 - 45. (in Chinese))
- [16] 徐涛, 唐春安, 张哲, 等. 单轴压缩条件下脆性岩石变形破坏的理论、试验与数值模拟[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2003, **24**(1): 88 - 91. (XU Tao, TANG Chun-an, ZHANG Zhe, et al. Theoretical, experimental and numerical studies on deformation and failure of brittle rock in uniaxial compression[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2003, **24**(1): 88 - 91. (in Chinese))
- [17] 李俊淞, 李力. 混凝土损伤断裂过程中的细观数值模拟研究[J]. 四川建筑, 2007, **27**(4): 98 - 102. (LI Jun-song, LI Li. Meso numerical simulation of concrete damage during fracture[J]. Sichuan Architecture, 2007, **27**(4): 98 - 102. (in Chinese))
- [18] 张艳霞, 何晖. 岩石声发射的 Kaiser 效应研究进展[J]. 地下空间与工程学报, 2007, **6**(3): 1090 - 1093. (ZHANG Yan-xia, HE Hui. Research progress on the Kaiser effect of rock acoustic emission[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2007, **6**(3): 1090 - 1093. (in Chinese))
- [19] 陈宇龙, 魏作安, 张千贵. 等幅循环加载与分级循环加载下砂岩声发射 Felicity 效应试验研究[J]. 煤炭学报, 2012, **37**(2): 227 - 230. (CHEN Yu-long, WEI Zuo-an, ZHANG Qian-gui. Experimental study on Felicity effect of acoustic emission in rock under cyclic loading and tiered cyclic loading[J]. Journal of China Coal Society, 2012, **37**(2): 227 - 230. (in Chinese))
- [20] 宋义敏, 杨小彬, 王振武. 基于变形场演化的洞室岩爆特征实验研究[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2012, **31**(5): 682 - 685. (SONG Yi-min, YANG Xiao-bin, WANG Zhen-wu. Experimental study of chamber rockburst based on displacement field evolution[J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2012, **31**(5): 682 - 685. (in Chinese))
- [21] JTG/T D70—2010 公路隧道设计细则[S]. 北京: 人民交通出版社, 2010. (JTG/T D70—2010 Guidelines for design of Highway tunnel[S]. Beijing: China Communication Press, 2010. (in Chinese))
- [22] 杨锋, 阮飞鹏. 加卸载响应比理论在隧道结构抗震稳定性评价中的应用[J]. 华北水利水电学院学报, 2011, **32**(5): 113 - 115. (YANG Feng, RUAN Fei-peng. Application of loading-unloading response ratio theory to aseismic stability assessment of tunnel[J]. Journal of North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power, 2011, **32**(5): 113 - 115. (in Chinese))