

文章编号: 1006-6616 (2011) 02-0200-11

不同弹模时圆形巷道围岩的应变 局部化数值模拟

王学滨, 王 玮, 潘一山

(辽宁工程技术大学 力学与工程学院, 辽宁 阜新 123000)

摘 要: 利用基于运动方程求解的 FLAC 程序模拟了不同弹性模量时圆形巷道的应变局部化过程。在计算中, 采用了“先加载, 后挖洞”方式。模拟结果表明, 在弹性模量中等或较小的条件下, 由于开挖卸荷而产生的围岩向空腔内部的“涌入”(运动)现象比较明显, 进而围岩中诱发了较多的破坏、V 形坑或短剪切带式破坏。在上述条件下, 基于静力平衡的解析及数值方法不再适用, 而且是偏于不安全的。弹性模量越小, 开挖之后, 围岩维持其均匀周向(或环向)变形的能力越差, 这种轴对称变形越容易被打破, 也被打破得越早。尽管随着弹性模量的增加, 破坏单元数的变化并不是单调的, 但是在总体上, 随着弹性模量的增加, 破坏单元数目降低, 最大剪切应变增量急剧单调下降。

关键词: 圆形巷道; 应变局部化; 剪切带; V 形坑; 弹性模量; 剪切应变

中图分类号: TU45

文献标识码: A

0 引言

在不同的工程领域中, 对地下洞室的猛烈破坏现象的称呼有所差异, 例如, 在煤矿中, 常称之为巷道冲击地压; 在石油工程领域, 常称之为井壁或井眼崩裂; 在金属矿、土木、水利及隧道工程领域, 常称之为岩爆。尽管如此, 这些破坏现象的实质都是雷同的, 都可以采用应变局部化的视角进行研究和分析。应变局部化是材料破坏之前的应变高度集中现象, 可以视为材料破坏的前兆, 在多种材料中都可以观察到, 例如, 岩石、混凝土、金属、合金、土及陶瓷等。裂纹通常出现在应变集中区域的中部, 根据梯度塑性理论分析的结果表明, 这一位置具有最高的应变、温度及最严重的损伤程度^[1-3]。

现场观测发现, 地下洞室的破坏形式多样, 例如, 如果存在主应力差, 常见的破坏形式是在一个直径相对的方向上产生 2 个 V 形坑^[4-5], 从而破坏后的洞室的轮廓呈现椭圆形; 在静水压力条件下, 在两个直径相对的方向上可以观察到 4 个 V 形坑^[6-7]。除此之外, 还可以观察到剪切带式破坏或离层式破坏^[8]。文献 [8] 认为, 由于洞室表面的不稳定性而出现了

收稿日期: 2010-03-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(编号: 50974069)及辽宁省教育厅科学研究一般项目(编号: 2009A322)资助。

作者简介: 王学滨(1975-), 男, 黑龙江双鸭山市, 博士, 教授, 博导, 从事非均质材料(岩石、混凝土及金属等)变形、破坏及稳定性研究。E-mail: wxbbb@263.net; Tel: (0418) -3350924。

井壁崩裂, 该不稳定性倾向于使洞室表面平行的微裂纹张开和激活, 进而导致了离层式破坏。如果这种表面的不稳定性是不可能的, 则主导的破坏模式是剪切破坏, 即形成一条弯曲的剪切带。

由于在理论方面, 分析上述提到的洞室的多种非均匀的破坏现象难度极大, 尽管圆形洞室的结构相对比较简单, 因而, 不得不去求助于数值分析的手段。由于一些针对厚壁筒问题的理论分析(将厚壁筒简化为圆环形的塑性区及外围的弹性区)及一些基于常规有限元法的数值分析都属于静力分析, 因而无法考虑由于开挖卸荷而产生的围岩向空腔内部的“涌入”(运动)现象, 因此, 开展基于运动方程求解的有限差分方法 FLAC 的数值分析具备一定的优势。FLAC 方法已经在矩形岩石试样的应变局部化及破坏过程分析方面取得了一些进展^[9-12], 但是, 在岩石中开挖圆形洞室方面的分析工作还比较少见。文献 [13~15] 利用 FLAC 及其内嵌编程语言编写 FISH, 在静水压力条件下, 采用“先加载, 后挖洞”的方式较好地模拟出了圆形洞室的 4 个 V 形坑式的剪切破坏, 研究了围压、扩容角及洞室直径(尺寸效应)的影响, 得到了一些实验结果^[6-8]的支持。

根据弹塑性理论, 均压厚壁圆筒的弹性区、塑性区的应力分布不依赖于弹性参数(弹性模量及泊松比), 因此, 弹性参数也不会影响均压厚壁圆筒的破坏形态。但是, 上述结论成立的前提条件是“先挖洞, 后加载”, 而且是基于静力平衡方程求解。在实际的岩石工程中, “先挖洞, 后加载”的情形几乎不存在。实践表明, 在软弱和坚硬的岩石中挖掘洞室后, 围岩的表现有重大的差异, 软岩中挖掘洞室后岩石的涌入现象比较明显, 需要及时支护, 而在硬岩中挖掘洞室后, 可能不需要支护, 岩爆可能发生。尽管软弱和坚硬岩石的许多力学参数不同, 但是, 至少弹性模量是不同的, 软弱岩石的弹性模量较小, 而坚硬的岩石的弹性模量较高。本文研究了在受载且处于静力平衡的岩石中, 突然开挖圆形洞室后, 由于岩石的弹性模量不同而在围岩中诱发的应变局部化图案的差异, 得到了一些新的观点。

1 计算模型、本构关系、计算步骤及 FISH 函数编写

1.1 计算模型及本构关系

矩形平面应变模型见图 1(a), 模型长(x 方向)及高(y 方向)均为 1m, 未开挖的模型被划分为 40000 个面积相同的矩形单元。模型四周受到静水压力 $p = 7.5$ MPa 作用, 即模型受到的水平及垂直方向的压缩应力相同。数值计算在小变形模式下进行。

本文采用了 14 个计算方案, 方案 1 的弹性模量最小, 方案 14 的弹性模量最大。以方案 8 的弹性模量为基准, 即 $E_0 = 26.6$ GPa, 则方案 1 至 7 的弹性模量分别为 $E_0/128$ 、 $E_0/64$ 、 $E_0/32$ 、 $E_0/16$ 、 $E_0/8$ 、 $E_0/4$ 及 $E_0/2$; 方案 9 至 14 的弹性模量分别为 $2E_0$ 、 $3E_0$ 、 $4E_0$ 、 $5E_0$ 、 $6E_0$ 及 $8E_0$ 。

各方案的孔径相同, 为 0.34m(直径)。在弹性阶段, 岩石的本构关系取为各向同性线弹性模型, 各方案的弹性模量取值不同, 泊松比取为 0.21。峰值强度后岩石的破坏准则取为带拉伸截断的莫尔库仑剪破坏模型, 抗拉强度取为 2MPa, 扩容角取为 0° 。在峰后, 内摩擦角及内聚力与塑性剪切应变的关系先是降低(应变软化), 然而分别达到残余内摩擦角及残余内聚力。内摩擦角-塑性剪切应变关系与文献 [9, 10] 中密实岩石的软化规律相同。内聚力-塑性剪切应变关系与文献 [9, 10] 中密实岩石的软化规律类似, 但是初始内聚力取为 4MPa。

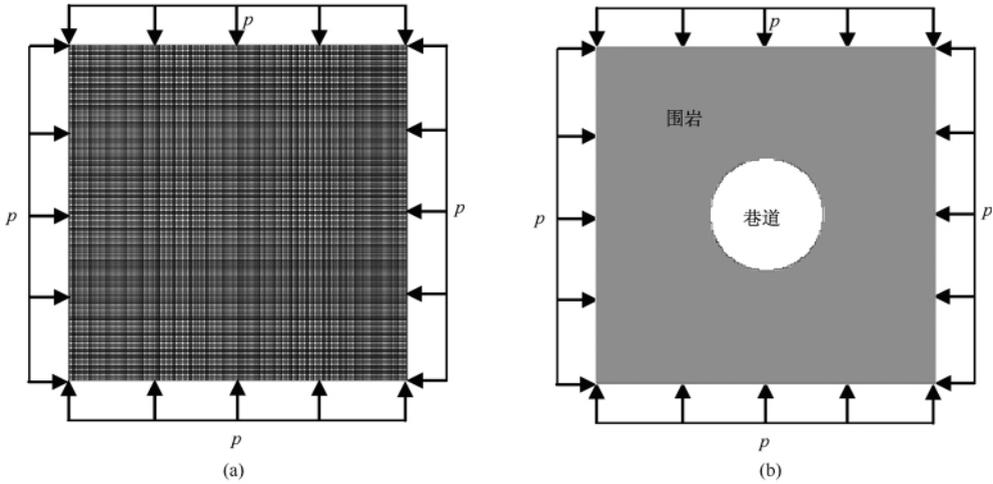


图1 模型的几何特征及边界条件

(a) 巷道开挖之前; (b) 巷道开挖之后

Fig. 1 Model geometry and boundary conditions

1.2 计算步骤

首先, 建立未开挖的模型 (见图 1 (a)), 给定本构关系、边界条件及加载条件, 进行数值计算 (FLAC 无论对静力问题求解还是对动力问题求解, 均是基于运动方程求解, 阻尼由 FLAC 自动施加), 直到模型达到静力平衡状态。若最大失衡力小于 $1.5 \times 10^{-3} \text{N}$ 则停止计算, 本文认为已经达到了静力平衡状态。

然后, 开挖巷道, 即将模型中巷道直径范围内的单元一次性删除 (见图 1 (b))。巷道开挖之后, 模型仍然受到静水压力作用, 由于开挖卸荷而引起了最大失衡力, 模型将不再处于静力平衡状态。

最后, 对开挖后的模型进行计算 (FLAC 自动施加阻尼), 直到达到一个新的平衡状态。

1.3 FISH 函数编写

FISH 是 FLAC 的内嵌编程语言, 它允许用户定义新的变量、函数和本构模型。用户开发的 FISH 函数不仅扩展了 FLAC 的功能, 而且添加了自定义的特色。

利用模型的几何尺寸, 确定模型的中心; 利用各单元节点的坐标, 确定各单元的中心; 求得各单元的中心至模型的中心距离, 若该距离小于巷道的半径, 则将这些单元设置为空模型 (Null Model), 以模拟巷道的开挖。

上述 FISH 函数是在模型被施加静水压力之后, 而且已经达到了静力平衡状态时开始执行的。这样, 可以实现巷道的自动开挖, 极大地降低了手工录入一系列语句的繁重任务。

2 计算结果及分析

2.1 图例说明

为了方便表述, 将巷道围岩划分为第 1 至第 4 象限。坐标原点取在巷道的中心, 水平向右为 x 轴正向, 垂直向上为 y 轴正向。 $x > 0$ 及 $y > 0$ 区域为第 1 象限, $x < 0$ 及 $y > 0$ 区域为第 2 象限, 依此类推。

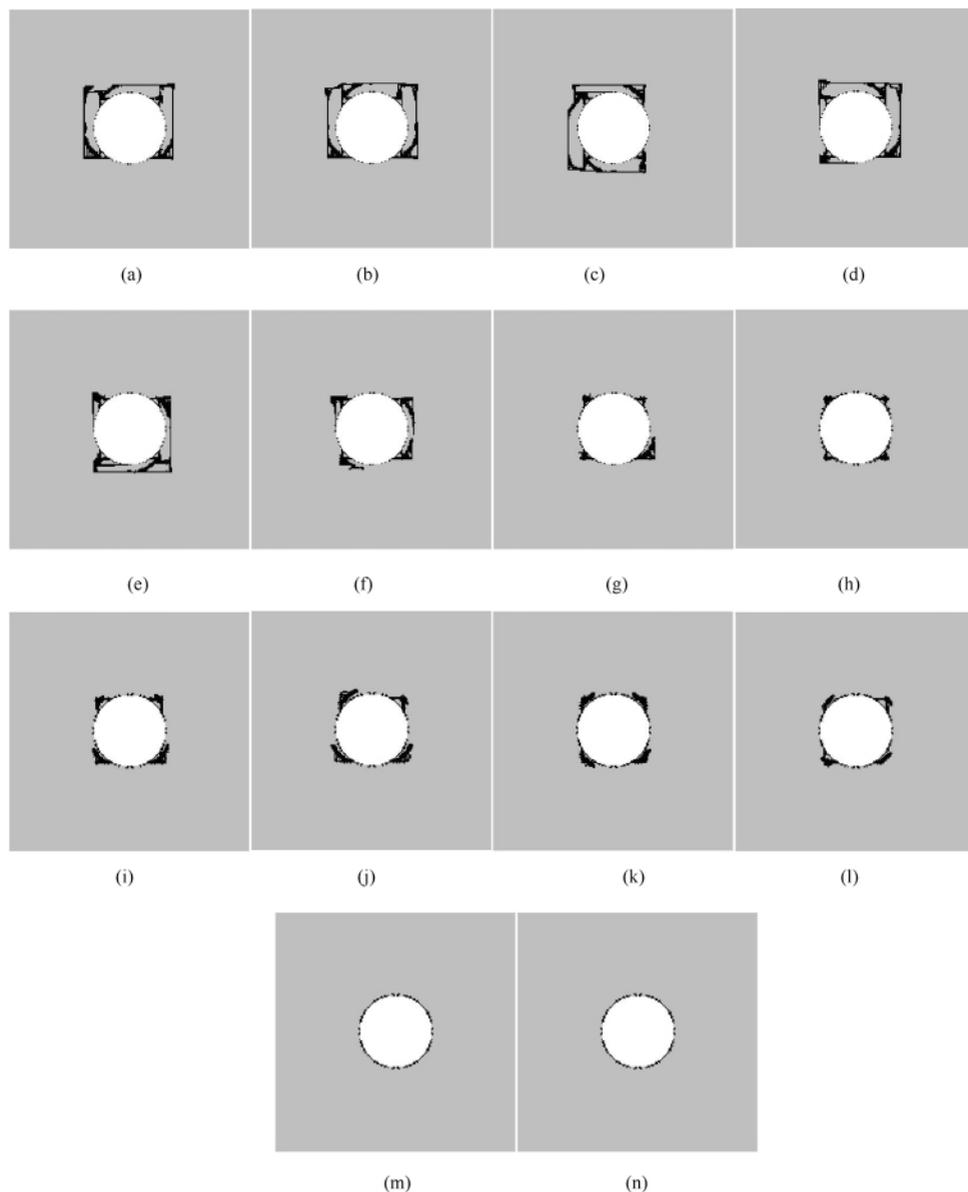


图 2 各方案围岩的破坏样式 (时步 = 60000)

Fig. 2 Failure modes in schemes 1 to 14 (step = 60000)

(a) 方案 1; (b) 方案 2; (c) 方案 3; (d) 方案 4; (e) 方案 5; (f) 方案 6; (g) 方案 7;
(h) 方案 8; (i) 方案 9; (j) 方案 10; (k) 方案 11; (l) 方案 12; (m) 方案 13; (n) 方案 14

图 2 (a-n) 是方案 1 至 14 围岩中的塑性区的分布图。图中的塑性区被显示为黑色, 而且这些图是巷道开挖之后再计算 60000 个时步时的计算结果。此时, 各计算方案均已经达到了静力平衡状态。这一点可由各方案的最大失衡力-时步曲线看出来。限于篇幅, 未给出所有方案的最大失衡力-时步曲线, 仅给出了方案 1、方案 8、方案 12 的最大失衡力-时步曲线, 分别见图 3 (i)、图 4 (e)、图 5 (h)。需要说明的是, FLAC 中的时步或时间步并非物理上的时间, 1 个时步为计算中的一个循环, 由节点速率求得单元新的应力。尽管时步与时间的含义不相同, 但是, 不妨将时步当作时间去理解。时步越多, 意味着巷道开挖后越久。另

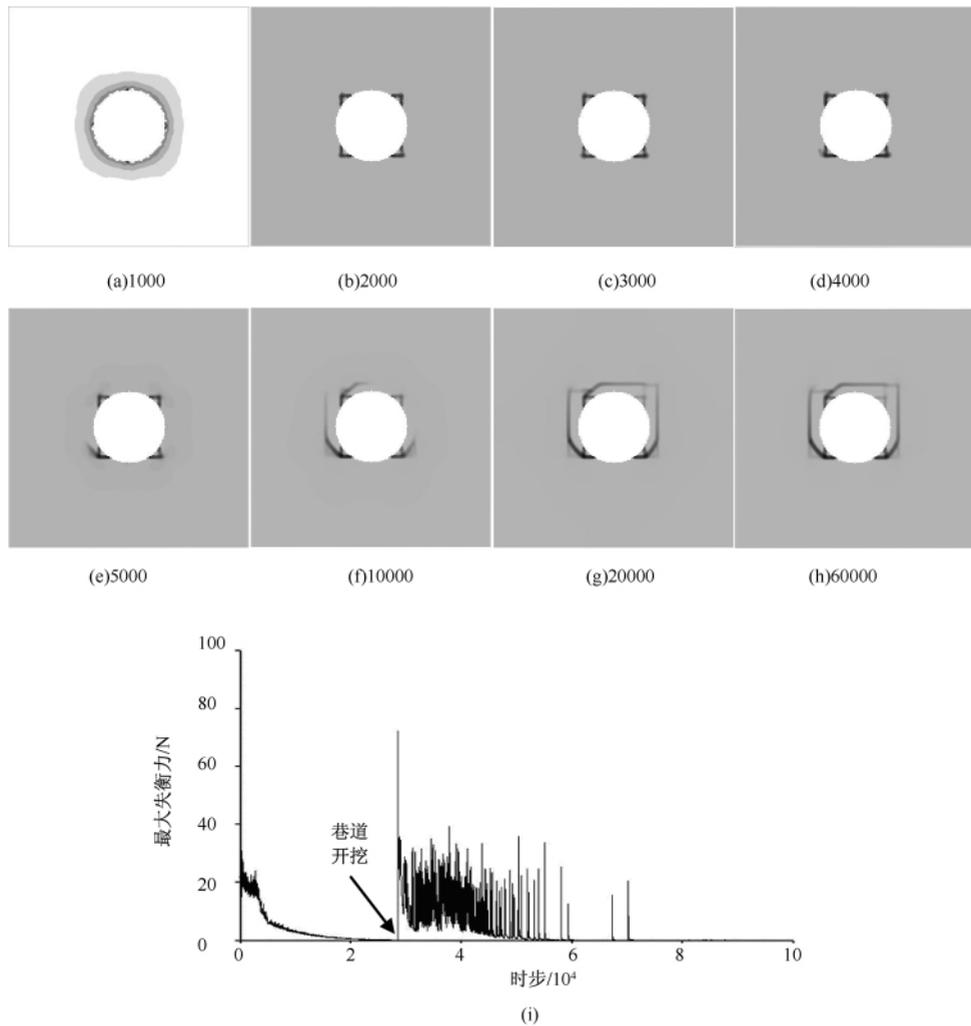


图3 方案1的破坏过程(a-h)及最大失衡力-时步曲线(i)

Fig. 3 The failure process (a-h) of scheme 1 and the maximum unbalanced force-timestep curve (i)

外,在FLAC中,塑性区包括剪切屈服塑性区和拉伸屈服塑性区,在图2中一律用黑色显示。

2.2 不同弹性模量时围岩的破坏类型

由图2可见,不同弹性模量时围岩的破坏类型大致可以划分为3类。方案1至6为1类(图2(a-f)),方案7至12为1类(图2(g-l)),方案13至14为1类(图2(m-n))。

在方案13至14中(图2(m-n)),仅巷道表面的一些单元发生了破坏,破坏的单元未能深入围岩内部,这是高弹性模量时的计算结果,类似于现场经常观察到的洞室表面的“掉渣”现象。

在低弹性模量时,即在方案1至6中(图2(a-f)),围岩发生了复杂的破坏样式。仔细观察可以发现,在方案1至6中,在围岩的第1至4象限各存在一个小的V形坑(一个V形坑由两条剪切带或破坏带构成),在V形坑的尖端位置(两条剪切带的交点)又发出了一些破坏带。这些破坏带可能穿越相邻的象限,与其它破坏带合并、融合,从而形成了一系列

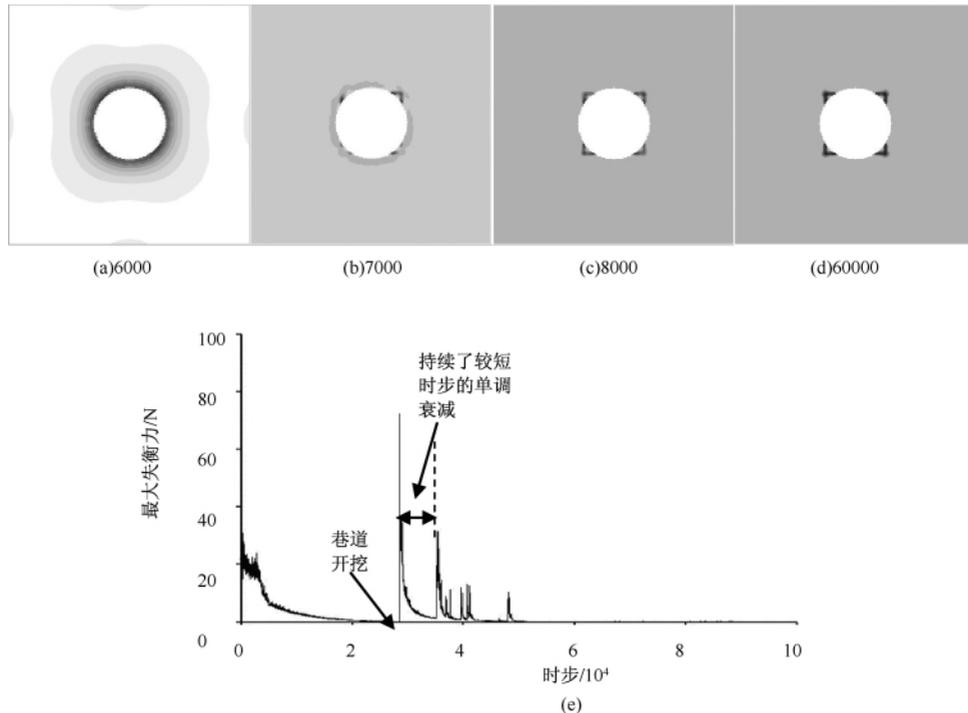


图 4 方案 8 的破坏过程 (a-d) 及最大失衡力-时步曲线 (e)

Fig. 4 The failure process (a-d) of scheme 8 and the maximum unbalanced force-time step curve (e)

狭长的岩石块体, 这些块体的长轴尺寸与洞室的直径相当。设想如果这些狭长的岩石块体都将落入或挤入洞室, 则将造成很严重的后果。显然, 若这些块体都掉落, 则洞室的外轮廓都大致变为矩形。

在适中的弹性模量时, 即在方案 7 至 12 中 (图 2 (g-l)), 可以观察到与低、高弹性模量时不同的围岩的破坏样式。一方面, 洞室断面的破坏是有限的, 未形成象方案 1 至 6 中那样大的狭长的不规则块体, 也未观察到仅洞室表面一些单元破坏的现象; 另一方面, 可以观察到 V 形坑和短的剪切带。这些 V 形坑在方案 7 至 8 中 (图 2 (g-h)) 尺寸较小, 而在方案 9、10、12 中 (图 2 (i-j)、(l)) 的 V 形坑的深度和范围要大一些。在方案 11 中 (图 2 (k)), 未观察到明显的 V 形坑, 仅有 4 条短的剪切带。在方案 7 至 12 中, 均观察到了短的剪切带, 只是数量和转向有差异。

图 2 的结果清晰地显示, 在受相同的载荷且处于静力平衡的岩石中开掘洞室, 当弹性模量不同时, 围岩的破坏样式有重大的差别。这一结果如果采用基于静力分析的解析和数值方法是难于解释的, 而 FLAC 无论求解的是静力问题还是动力问题都是对运动方程进行求解, 这区别于传统的有限元方法和解析方法。

2.3 不同弹性模量时围岩破坏形态差异的原因

当弹性模量高时, 岩石在受载相同且处于静力平衡的条件下, 变形小, 围岩中储存的弹性应变能少。当洞室被一次性突然开掘后, 洞室表面附近的岩石向洞室内部的“涌入”或“挤入”现象不明显, 加之围岩有足够的强度储备 (内聚力、内摩擦角和抗拉强度足够大), 因此, 围岩面对这种突然的开挖卸荷能快速“挺”过来, 围岩中的应力重新分布后马上进入了新的静力平衡状态。当弹性模量高时, 围岩的再次平衡对洞室开挖的响应是快速的, 不

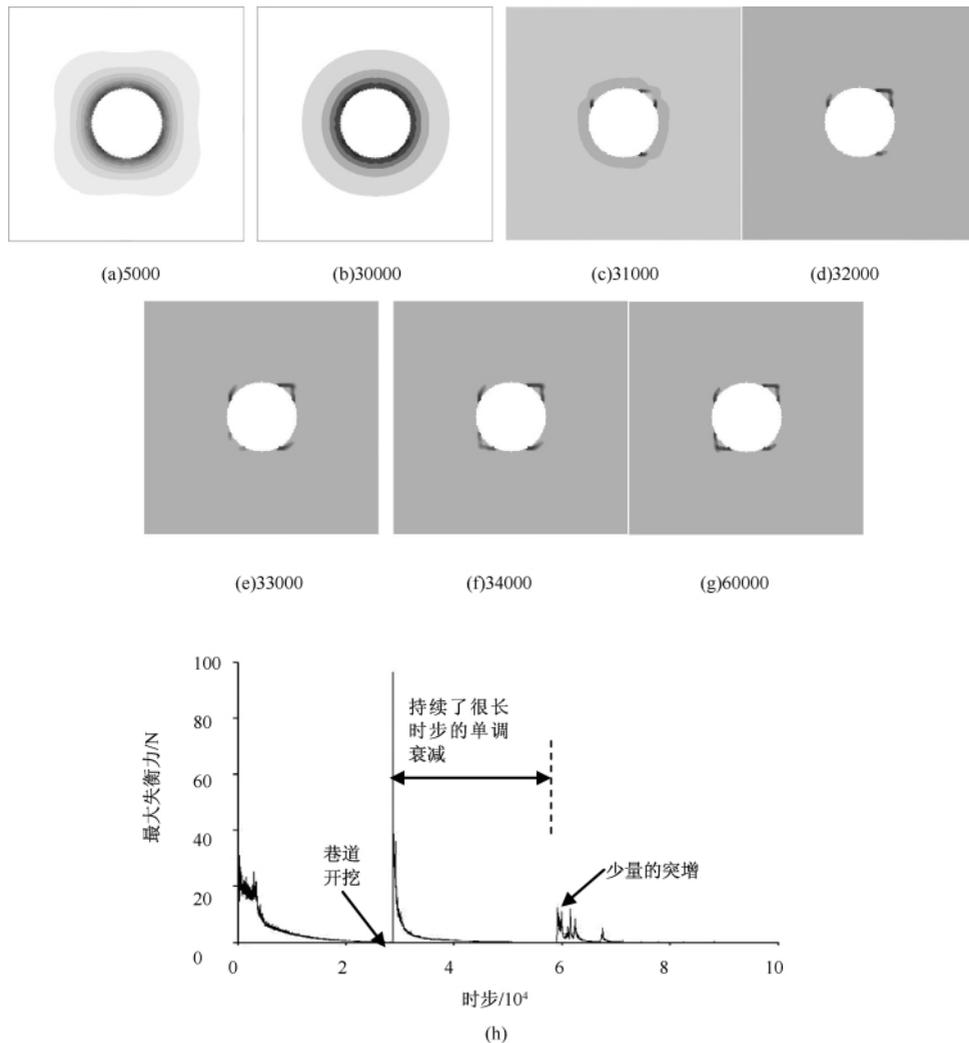


图5 方案12的破坏过程(a-g)及最大失衡力-时步曲线(h)

Fig.5 The failure process (a-g) of scheme 12 and the maximum unbalanced force-time step curve (h)

需要过程，基于静力平衡的力学分析方法更加适用。

当弹性模量低时，岩石在受载相同且处于静力平衡的条件下，变形大，围岩中储存的弹性应变能多。当洞室被一次性突然开掘后，由于开挖卸荷，洞室表面附近的岩石向空腔的“涌入”的现象将十分明显。由计算结果可以发现，有较多的单元在“涌入”过程中发生了破坏。可以推测，明显的“涌入”运动将致使许多岩石单元的应力提高，进而超过了由内聚力、内摩擦角决定的抗剪强度和抗拉强度。“涌入”运动越明显，在此过程中破坏的单元越多。当弹性模量低时，当洞室被一次性突然开掘后，围岩向空腔的“涌入”的运动未能马上被制止，“涌入”和强度的“发挥”（起作用）的博弈要持续一段时间（或时步），或者说，围岩中的应力的重新分布需要一个调整的过程，之后才能达到新的静力平衡状态。在弹性模量低的条件下，围岩的再次平衡对洞室开挖的响应是缓慢的，需要一个过程，基于静力平衡的力学分析方法不再适用。

当弹性模量适中时，当洞室被一次性突然开掘后，围岩向空腔的“涌入”的运动是有

限的,有限的“涌入”所引起的应力提高也适中。在这种条件下,围岩中产生了V形坑和短的剪切带式样^[6-8]。在岩爆后的现场,常能看到这种V形坑,因而也常称之为岩爆坑。当弹性模量适中时,由于仍然存在一定的“涌入”现象,因而,基于静力平衡的力学分析方法也不再适用。

2.4 不同弹性模量时围岩的破坏过程

图3至图5分别给出了方案1、8及12围岩的应变局部化过程及最大失衡力-时步曲线。图3至图5中的深色区域是剪切应变增量的高值区域,带状的剪切应变增量的高值区域就是常称的剪切局部化带,简称为剪切带。应当指出,图3(a-h)、图4(a-d)、图5(a-g)中的时步均是相对时步,是从巷道开挖开始计算的,不是从施加静水压力之时开始计算的。而且,正文文字中出现的时步都是从巷道开挖开始计算的。

图3显示,低弹性模量时,即 $E_0/128$,当时步等于1000时,剪切应变集中区域是环绕巷道的薄圆环(图3(a))。此过程持续的时间或时间步非常短暂。马上就出现了4个V形坑,这一过程一直持续到4000个时步(图3(b-d)),随后,由V形坑的尖端发出了狭长的剪切带,穿越了相邻的象限,与其它的剪切带汇聚,从而形成了被狭长剪切带从围岩中所割裂的不规则岩石块体(图3(e-g))。最终,这种破坏形式保持不变(图3(h)),从图3(i)给出的最大失衡力-时步曲线也可以发现这一点,当时步等于60000时,最大失衡力已经小到凭肉眼无法分辨的程度。

图4显示了方案8围岩中V形坑的形成过程。图5显示了方案12围岩中较大的V形坑及短剪切带的形成过程。图5显示,在洞室被开挖之后,最大失衡力突然增加,然后逐渐单调式衰减,这一过程持续了很长的时间或时步,大致经历了30000个时步,之后才发生了少量的突然增加。由图5(a-b)可以发现,在30000个时步之前,剪切应变集中区域还是环绕巷道的薄圆环。而在图4中,在开挖之后,最大失衡力突然增加之后的单调衰减持续的过程要比图5短。在图3中,这一过程更短(甚至凭借肉眼很难分辨)。这说明,弹性模量越小,开挖之后,围岩维持其均匀周向(或环向)变形的能力越差,这种轴对称变形越容易被打破,也被打破得越早。在方案13至14中(图2(m-n)),在开挖之后,仅巷道表面的一些单元发生了破坏,剪切应变集中区域始终是环绕巷道的薄圆环,周向(或环向)均匀变形的一直未被打破,这为上述观点提供了反证。

基于静力平衡的解析及数值方法可能更适于方案13至14情形的分析,即弹性模量高时,在这种条件下,由于开挖卸荷而产生的围岩向空腔内部的“涌入”(运动)可以忽略。本文利用基于运动学求解的FLAC方法的数值分析表明,在弹性模量中等或较小的条件下,开挖卸荷而产生的围岩向空腔内部的“涌入”(运动)现象比较明显,进而围岩发生了较多的破坏(方案1至6)、V形坑及短剪切带式破坏(方案7至12)。在上述条件下,基于静力平衡的解析及数值方法不再适用,而且也是偏于不安全的,这正是本文研究的意义所在。

2.5 不同弹性模量时破坏单元数及最大剪切应变增量

图6(a)给出了各方案的最大剪切应变增量,可以发现,随着弹性模量的增加,最大剪切应变增量急剧单调下降。

图6(b)给出了各方案的破坏单元数,是对图2中黑色单元的统计结果。可以发现,尽管破坏单元数曲线并不是单调的,在总体上,随着弹性模量的增加,破坏单元数降低。

图7给出了一些实验结果和示意图。可以发现,文献[6~7]的实验结果(图7(a-b))与本文的计算结果(图2(h)、图4(c-d))比较类似。文献[8]给出的洞室发生剪

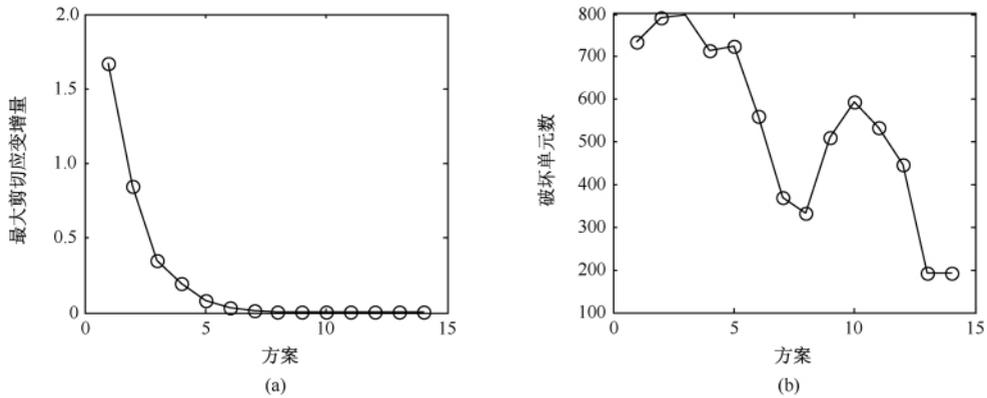


图6 不同方案的破坏单元数及最大剪切应变增量

Fig. 6 The numbers of failed elements and the maximum shear strain increments in different schemes

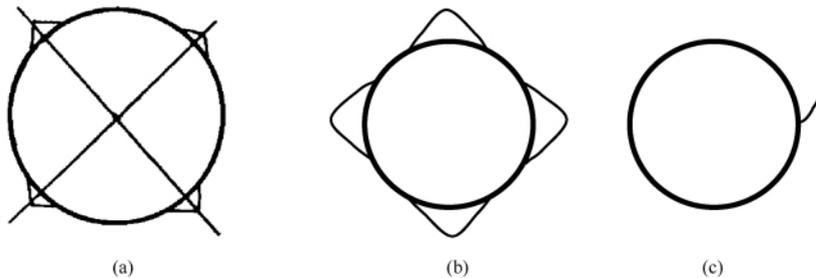


图7 V形坑 (a-b)^[6-7] 及短剪切带 (c)^[8]

Fig. 7 The V-shaped notches (a-b)^[6-7] and shorter shear bands (c)^[8]

切破坏的示意图 (图7 (c)) 与本文通过计算得到的短剪切带 (图5 (c-g) 的第2、4象限、图2 (g) 的第4象限、图2 (i) 的第3、4象限、图2 (j) 的第2、3、4象限、图2 (k) 的第1至4象限及图2 (l) 的第2、4象限) 类似。

3 结 论

1) 本文利用基于运动方程求解的FLAC的数值分析表明,在“先加载,后挖洞”条件下,当弹性模量中等或较小时,由于开挖卸荷而产生的围岩向空腔内部的“涌入”(运动)现象比较明显,这导致围岩发生了较多的破坏、V形坑或短剪切带式破坏。当弹性模量中等或较小时,“先挖洞,后加载”的基于静力平衡的解析方法及数值方法不再适用,而且是偏于不安全的。

2) 岩石的弹性模量越小,地下洞室被开挖之后,围岩维持其均匀周向(或环向)变形的能力越差,这种轴对称的变形模式越容易被打破,也被打破得越早。尽管随着岩石弹性模量的增加,围岩内部的破坏单元数的变化并不是单调的,但是在总体上,随着岩石弹性模量的增加,围岩内部的破坏单元数目降低,最大剪切应变增量急剧单调下降。

参 考 文 献

- [1] Wang Xue-bin. Temperature distribution in adiabatic shear band for ductile metal based Johnson-Cook and gradient plasticity models [J]. *Trans Nonferrous Met Soc China*, 2006, 16 (2): 333 ~ 338.
- [2] Wang X B. Effects of temperature and strain rate on the evolution of thickness of transformed adiabatic shear band [J]. *Solid State Phenomena*, 2008, 138: 385 ~ 392.
- [3] Wang Xue-bin. A method for calculating the damage evolution in the adiabatic shear band of Titanium alloy [J]. *Trans Nonferrous Met Soc China*, 2009, 19 (5): 1280 ~ 1285.
- [4] Martin C D. The effect of cohesion loss and stress path on brittle rock strength [J]. *Can Geotech*, 1997, 34: 698 ~ 725.
- [5] Hajiabdolmajid V, Kaiser P K, Martin C D. Modelling brittle failure of rock [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2002, 39 (6): 731 ~ 741.
- [6] 陆家佑, 王昌明. 根据岩爆反分析岩体应力研究 [J]. *长江科学院院报*, 1994, 11 (3): 27 ~ 30.
Lu Jia-you, Wang Chang-ming. Study on back analysis for stress of rock mass from information of rockbursts [J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 1994, 11 (3): 27 ~ 30.
- [7] Guenot A. Borehole breakout and stress fields [J]. *Int J Rock Mech Min Sci*, 1989, 26: 185 ~ 195.
- [8] Vardoulakis I G, Papanastasiou P C. Bifurcation analysis of deep boreholes: I. Surface instabilities [J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 1988, 12: 379 ~ 399.
- [9] 王学滨. 不同强度岩石的破坏过程及声发射数值模拟 [J]. *北京科技大学学报*, 2008, 30 (8): 837 ~ 843.
Wang Xue-bin. Numerical simulation of failure processes and acoustic emissions of rock specimens with different strengths [J]. *Journal of University of Science and Technology Beijing*, 2008, 30 (8): 837 ~ 843.
- [10] 王学滨. 扩容角对初始随机材料缺陷岩石试样破坏过程及力学行为的影响 [J]. *中国有色金属学报*, 2007, 17 (7): 1063 ~ 1071.
Wang Xue-bin. Effects of dilation angle on failure process and mechanical behavior for rock specimen with random material imperfections [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2007, 17 (7): 1063 ~ 1071.
- [11] 王学滨. 应变软化扩容对含随机缺陷岩石的渐进变形及破坏前兆特征的影响 [J]. *地质力学学报*, 2008, 14 (2): 158 ~ 167.
Wang Xue-bin. Effects of strain-softening dilatancy on progressive deformations and precursors to failure of rock with initial random imperfections [J]. *Journal of Geomechanics*, 2008, 14 (2): 158 ~ 167.
- [12] 王学滨. 强度参数对初始随机缺陷岩样全部变形的影响 [J]. *地质力学学报*, 2009, 15 (4): 321 ~ 329.
Wang Xue-bin. Influence of strength parameters on overall deformations of rock specimen with initially random material imperfections [J]. *Journal of Geomechanics*, 2009, 15 (4): 321 ~ 329.
- [13] Wang Xue-bin, Pan Yi-shan. Numerical simulation of size effect in circular tunnel rockburst [A]. *Seventh International Symposium on Rockburst and Seismicity in Mines Proceedings: Controlling Seismic Hazard and Sustainable Development of Deep Mines* [C]. New York/New Jersey: Rinton Press, 2009, 137 ~ 142.
- [14] 王学滨, 潘一山, 王 玮. 不同围压条件下圆形巷道岩爆过程模拟 [J]. *防灾减灾工程学报*, 2009, 29 (6): 597 ~ 603.
Wang Xue-bin, Pan Yi-shan, Wang Wei. Numerical simulation of rockburst processes of a circular tunnel at different confining pressures [J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2009, 29 (6): 597 ~ 603.
- [15] 王学滨, 潘一山, 张智慧. 扩容角对圆形巷道岩爆过程的影响 [J]. *中国工程科学*, 2010, 12 (2): 40 ~ 46.
Wang Xue-bin, Pan Yi-shan, Zhang Zhi-hui. Numerical simulation of the rockburst processes of a circular tunnel at different dilation angles [J]. *Engineering Sciences*, 2010, 12 (2): 40 ~ 46.

NUMERICAL SIMULATION OF THE STRAIN LOCALIZATION OF A CIRCULAR TUNNEL AT DIFFERENT ELASTIC MODULI

WANG Xue-bin , WANG Wei , PAN Yi-shan

(College of Mechanics and Engineering , Liaoning Technical University , Fuxin , Liaoning 123000 , China)

Abstract: Strain localization processes of a circular tunnel at different elastic moduli are modeled by use of FLAC where the solution is based on equations of motion. In the present calculation , the tunnel is excavated after the model is loaded to reach a static equilibrium state. The numerical results show that at low and moderate elastic moduli , the movement of the surrounding rock toward the center of the tunnel is apparent once the tunnel is excavated , generating many fracture bands , V-shaped notches and shorter shear bands. The analyses and numerical simulations based on static equilibrium , which may yield unsafe solutions , cannot be applied to these cases. When the elastic modulus is lower , the capacity of the surrounding rock maintaining uniform circumferential or loop deformation is worse , and the axially-symmetrical deformation mode is easier to be broken and broken earlier. Although the failed number of elements is not monotonic with an increase of the elastic modulus , in general , as the elastic modulus is increased , the failed number of elements decreases , and the maximum shear strain increment is decreased monotonically and rapidly.

Key words: circular tunnel; strain localization; shear band; elastic modulus; shear strain