

剪切带图案的复杂性及应力-应变曲线的离散性

王学滨

(辽宁工程技术大学 力学与工程科学系, 辽宁 阜新 123000)

摘 要：在平面应变压缩条件下，通过在岩样左边界靠近下端面的位置及右边界的不同位置预制材料缺陷，采用拉格朗日元法研究了材料缺陷位置不同时的剪切带图案启动、演变及试样的宏观力学行为。在数值计算中，采用了莫尔-库仑与拉破坏复合的破坏准则，峰后岩石的本构关系为线性应变软化。当试样左、右边界上的缺陷距离较远时，剪切带仅出现 1 条，以通过两缺陷形式贯通试样两边界；当两缺陷距离较近时，启动于缺陷附近的剪切带按各自其固有方向发展，剪切带图案十分复杂。当右缺陷距离试样上端面较近时，由于上端面的约束，仅位于缺陷下方的剪切带能得到充分的发展。若剪切带数量较少且贯通试样两边界时，试样发生脆性剪切破坏，应力-变形曲线软化段比较陡峭；反之，发生韧性剪切破坏，软化段比较平缓。当剪切带的前端迎面遇到试样上、下端面附近的上、下三角形区域时，由于端面的约束，剪切带的方向将改变。当剪切带的前端与试样的纵向对称线距离较近时，剪切带发生折射现象；当距离较远时，剪切带将发生反射现象。

关 键 词：岩石力学；剪切带；材料缺陷；应力-应变曲线；端面约束；韧性剪切破坏；脆性剪切破坏

中图分类号：TU 451

文献标识码：A

Complexity of shear band patterns and discreteness of stress-strain curves

WANG Xue-bin

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

Abstract: Effects of positions of material imperfection at right edge of rock specimen under plane strain compression on initiation and evolution of shear bands as well as stress-strain curves of rock specimen were modeled numerically by FLAC. Two material imperfections were introduced in the form of null element at left and right edges of specimen, respectively. The material imperfection at left edge was fixed; however, the positions of material imperfection at right edge were different for different schemes. The adopted failure criterion was a composite Mohr-Coulomb criterion with tension cut-off and post-peak constitutive relation of rock was linear strain-softening. Only one shear band bisecting specimen through two imperfections is formed and only full development of shear band below right material imperfection is permitted due to end restraint at top of specimen when right imperfection is close to the top. When right imperfection is not close to the top, shear bands are initiated in the vicinity of material imperfections and propagate along their inherent directions so that patterns of shear bands are very complex. Stress-strain curve beyond the peak strength exhibits steeper behavior when the number of shear bands intersecting specimen is lower. Otherwise, strain-softening branch of stress-strain curve undergoes ductile behavior. In the process of shear band propagation, when the tip of shear band head-on approaches two triangular regions affected by strong restraint at top or base of specimen, direction of shear band has to be changed. If the tip is very closer to the symmetrical line in vertical direction of specimen, direction of shear band will be slightly changed (the phenomenon is called shear band refraction). However, if the tip is not very closer to the symmetrical line, the direction will be changed greatly (the phenomenon is called shear band reflection).

Key words: rock mechanics; shear band; material imperfection; stress-strain curve; end restraint; ductile shear failure; brittle shear failure

1 引 言

近年来，应变局部化、剪切带、应变软化及稳定性等问题一直是国际上固体力学及岩土力学领域

的研究热点问题之一，这是描述岩土介质真实破坏过程的理论。虽然这项研究起步不久，但对判断岩土工程的失稳与破坏起着重大的作用，因而必将成为岩土塑性理论中的重要组成部分^[1]。国内的许多学者在这方面也做了许多有益的工作^[2~17]，文献[2, 3]对应变局部化的多种理论及数值模拟方法研究进展进行了比较详细的论述。最近，有人基于梯度塑性理论，在非均质工程材料（岩石、金属及混凝土）的变形、破坏及稳定性等方面进行了一些探索^[15~19]，但所采用的单轴压缩、单轴拉伸及直接剪切试验的力学模型相对都比较简单，离真实岩土材料受力状态还有不少差距。

为了深入理解平面应变状态下岩样在压缩载荷作用下的破坏机制及过程，文献[20~26]采用拉格朗日元法（FLAC）研究了岩样尺寸、围压、应变率、扩容及端面约束对局部化图案的影响。

本文通过在岩样左边界及右边界的不同位置预制材料缺陷，激发了不均匀的变形场。从剪切应变增量的二维等值线图出发，研究了右缺陷位置不同时剪切带图案的启动、演化规律及全程应力-变形曲线的性状，发现了剪切带的转折及反射现象，对剪切带图案与应力-变形曲线软化段性状的关系进行了探讨。

2 本构关系及计算模型

计算模型的几何尺寸、单元划分及边界条件见图 1。试样下端面被约束，在试样上端面施加常速度， $v=2\times 10^{-9}$ m/时步，计算是在小变形模式及平面应变状态下进行。试样上、下端面的岩石质点仅允许向下运动，其它方向的运动都被约束，这对应于上、下端面与试验机压头之间存在较大摩擦力的情形。

在弹性阶段，岩石的本构关系为线弹性，体积模量取 15 GPa，剪切模量取 11 GPa。峰值强度后岩石的本构模型取莫尔-库仑剪破坏与拉破坏复合的应变软化模型，抗拉强度取 200 kPa。凝聚力、内摩擦角与塑性应变的关系见图 2，初始凝聚力取 275 kPa，初始内摩擦角取 44°。

为了得到不对称的剪切带图案，在试样左边界靠近下端面的位置及右边界的不同位置预制材料缺陷。具有材料缺陷的单元是一个空单元。计算采用 10 个方案。在方案 1 中，第 21 及 780 号单元被置空，在方案 2 中，第 21 及 700 号单元被置空，依此类推，直到在方案 10 中，第 21 及 60 号单元被置空。

3 结果分析及讨论

3.1 图例说明

图 3~10 分别是方案 1、方案 3~6 和方案 8~10 不同时间步的剪切应变增量二维等值线图的数值结果，图 3~10 的时间步（个）分别为 1 500，2 000，2 200，2 400，2 600，2 800，3 000 及 3 200。限于篇幅，方案 2 及方案的数值结果不再给出。

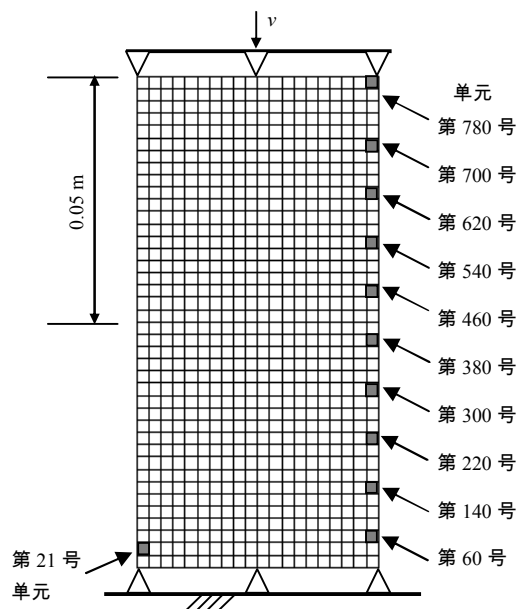


图 1 模型的几何特征及边界条件
Fig.1 Model geometry and boundary conditions

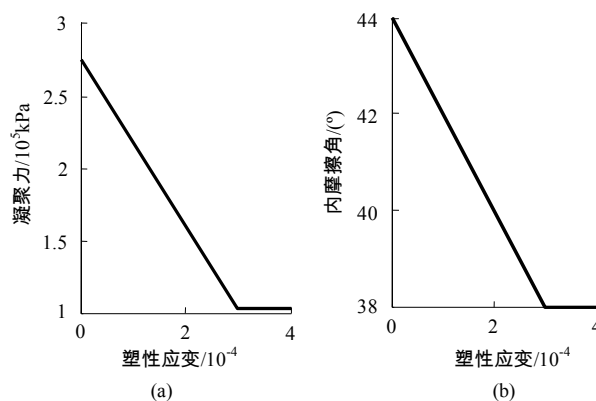


图 2 内摩擦角、凝聚力与塑性应变的关系
Fig.2 Relation between plastic strain, friction angle and cohesion

图 3~10 中某些位置的等值线越密，表示位于这些位置的单元具有的剪切应变增量越大。时间步数 t 与试样上端面的压缩位移 s 的关系， $s = vt$ 。因此，很容易将时间步数换算成试样上端面的位移或轴向应变。图 3~10 中各图的横、纵坐标轴上的数字（1~20，1~40）分别表示在水平及垂直方向上各单元。

图 11 给出了方案 1~6 的应力-变形曲线的一部分。图 12 给出了方案 6~10 的应力-变形曲线的一部分。在这两个图中，岩样上端面的压缩位移小于 4×10^{-6} m 的曲线均被省略，是由于缺陷的具体位置

对应力-变形曲线的这一部分影响甚小, 图中数字表示各个方案。

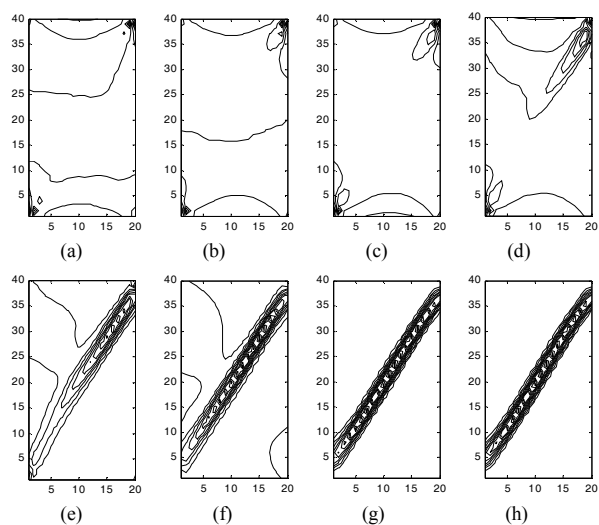


图3 方案1不同时间步的剪切应变增量
Fig.3 Shear strain increments for different time steps in scheme 1

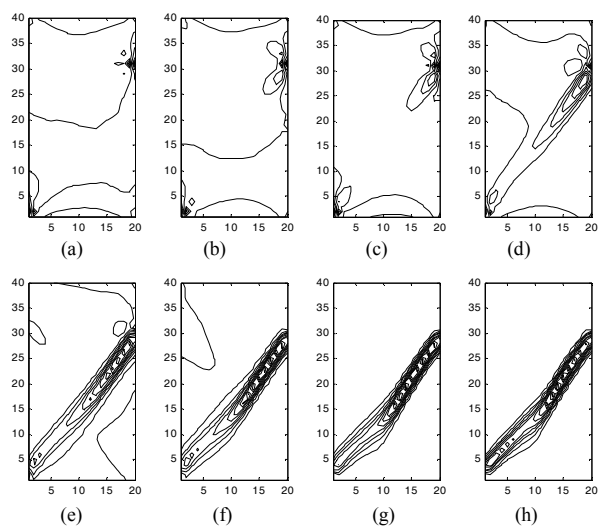


图4 方案3不同时间步的剪切应变增量
Fig.4 Shear strain increments for different time steps in scheme 3

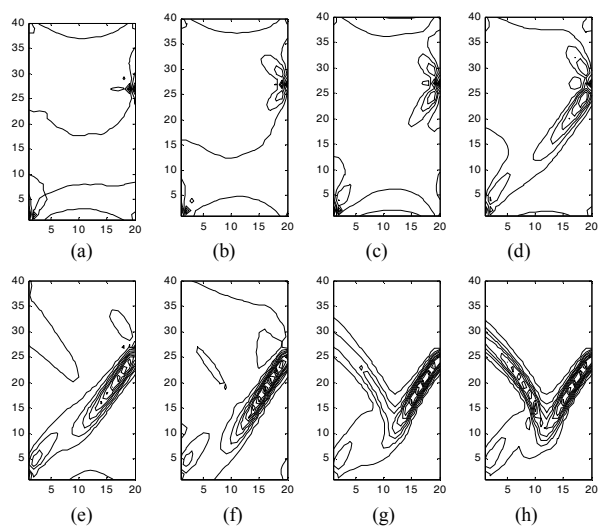


图5 方案4不同时间步的剪切应变增量
Fig.5 Shear strain increments for different time steps in scheme 4

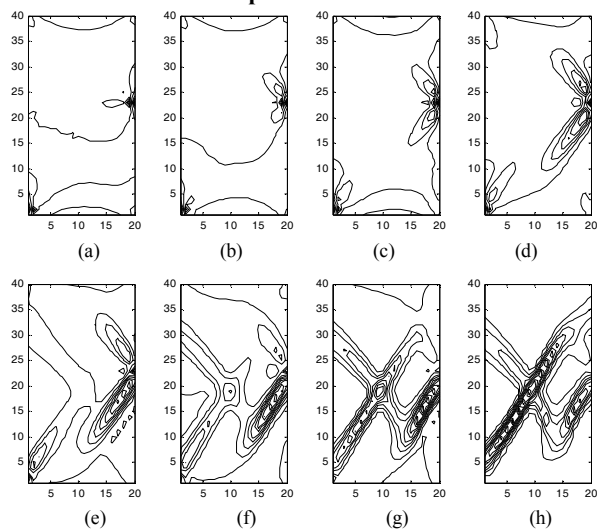


图6 方案5不同时间步的剪切应变增量
Fig.6 Shear strain increments for different time steps in scheme 5

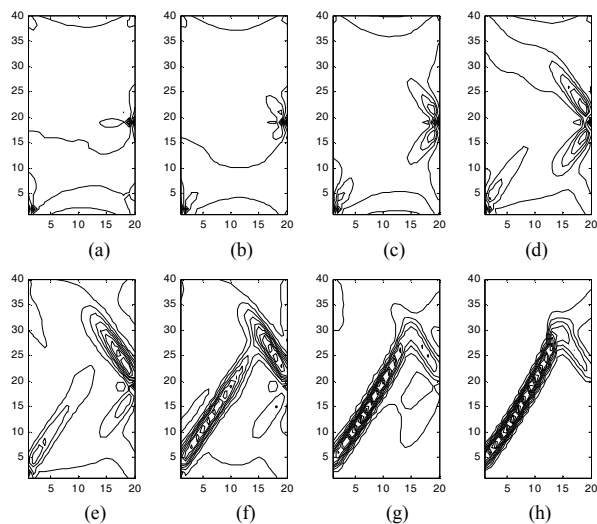
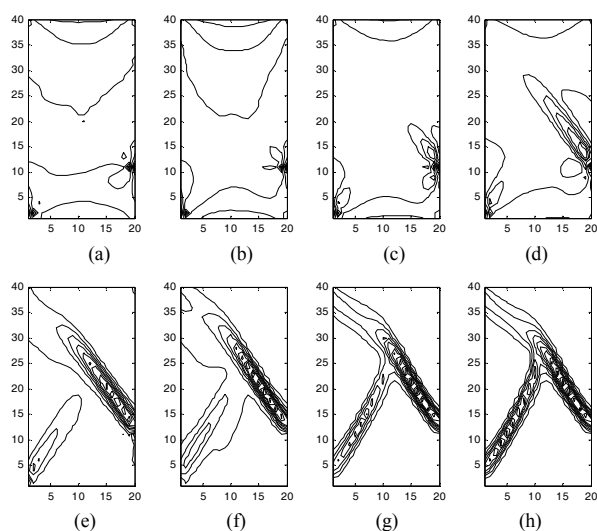


图7 方案6不同时间步的剪切应变增量
Fig.7 Shear strain increments for different time steps in scheme 6



28 图 8 方案 8 不同时间步的剪切应变增量
Fig.8 Shear strain increments for different time steps in scheme 8

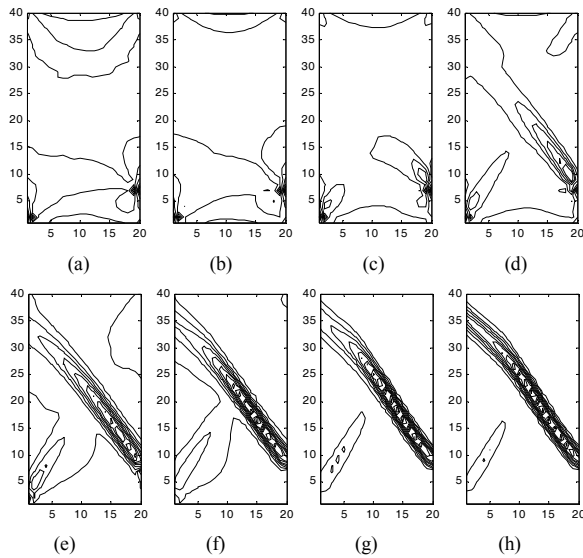


图 9 方案 9 不同时间步的剪切应变增量
Fig.9 Shear strain increments for different time steps in scheme 9

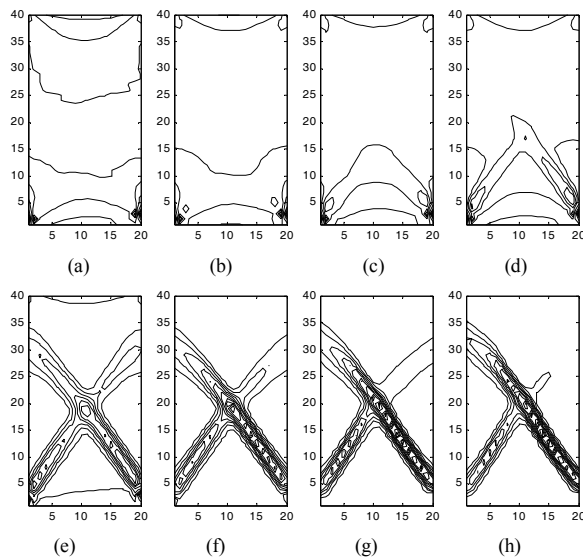


图 10 方案 10 不同时间步的剪切应变增量
Fig.10 Shear strain increments for different time steps in scheme 10

3.2 剪切带图案的复杂性

对于方案 1 (图 3), 在 1 500 个时间步以下 (包含 1 500 个时间步), 剪切应变增量场是比较均匀的。当时间步达到 2 000 个时 (图 3(d)), 一条剪切应变集中带 (称之为局部化带或剪切带) 出现在试样右边界缺陷附近。位于试样左边界缺陷附近的单元也存在一定的剪切应变集中现象, 但集中程度较弱。随着时步的增加, 见图 3(a)~图 3(f), 使得试样右边界缺陷附近的剪切带长度不断增加, 沿两缺陷连线方向传播, 直到贯穿试样的左边界。

对于方案 3, 启动于试样右边界缺陷附近的剪切带向试样内部传播过程中, 见图 4(d)~图 4(e), 先保持直线状态, 剪切带的倾角保持为一个值, 这一点与方案 1 相同。但是, 当剪切带的前端接近试样的纵向对称线时, 剪切带的方向明显发生了转折, 剪切带的切向与水平轴之间所夹的锐角 (剪切带倾角) 明显变小, 见图 4(f)~图 4(h), 这一点与方案 1 有所不同。笔者认为, 出现这种现象的原因是强烈的端面约束的作用, 使接近岩样下端面的三角形区域 (“ Δ ”) 内部的变形的发展受到阻碍, 因而, 剪切带在这一位置不能形成, 从而迫使剪切带的方向发生了转折。本文称上述现象为剪切带的转折现象 (或称之为折射现象)。

对于方案 4 (图 5(c)), 在试样右边界缺陷附近, 形成了两条长度较短的剪切带, 它们是共轭的, 一个位于缺陷的上方, 一个位于缺陷的下方。在随后的变形过程中, 位于缺陷上方的剪切带的发展被抑制, 逐渐消亡。位于缺陷下方的剪切带按其固有方向向试样内部传播, 得到了一定程度的发展。但是, 由于受到了试样下端面的约束, 其向试样下端面方向的进一步发展被阻止。剪切带的方向发生了大幅度的改变, 改由向试样的左上部发展, 直到贯穿试样的左边界。应当指出, 位于试样左边界缺陷附近的剪切带尽管也有一定程度的发展, 但在试样变形过程中, 并不占优势。本文称剪切带先向试样下部传播, 最终转变为向试样上部传播的现象为剪切带的反射现象。出现该现象的原因是, 当剪切带的前端尚未抵达试样的纵向对称线时, 剪切带的前端与试样下端面的距离已经非常近, 由于试样下端面的强烈的约束作用, 使剪切带不能发生折射现象, 而发生了反射现象。笔者认为, 如果在上述条件下, 剪切带若发生折射现象, 剪切带倾角将很小, 这将极大地增加剪切变形阻力, 因而, 剪切带不会走这条路线, 而是选择既变形阻力小, 又符合其传播的固有方向的路线。

对于方案 5 (图 6(d)~图 6(f)), 位于试样右边界缺陷上方的剪切带仍然不占优势; 位于试样右边界缺陷下方的剪切带的前端在接近试样的纵向对称线时, 发生了反射现象。上述 2 点与方案 4 是类似的。但是, 与方案 1、方案 3 及方案 4 不同, 对于方案 5, 位于试样左边界缺陷附近的剪切带也得到了充分的发展, 其发展方向平行于启动于试样右边界缺陷附近的剪切带, 最终贯通试样的右边界。另外, 与启动于试样左边界缺陷附近的剪切带相共轭的一条剪切带也得到了发展, 并与启动于试样右边

界缺陷附近的剪切带反射后的剪切带重合在一起, 见图 5(g)~图 5(h)。试样内部最终出现 3 条清晰的剪切带, 将发生韧性剪切破坏。

对于方案 6 (图 7(d)~图 7(f)), 在试样右边界缺陷附近, 形成了 2 条长度较短的共轭的剪切带。位于缺陷下方的剪切带明显处于劣势, 而位于缺陷上方的剪切带明显占优势, 并一直保持到最后。这一点与过去的计算结果很不相同。由于试样上端面的约束, 启动于试样左边界缺陷附近的剪切带及位于试样右边界缺陷上方的剪切带的前端在接近试样上端面时均被阻止, 重叠在一起, 见图 7(g)~图 7(h)。

对于方案 8 (图 8), 试样右边界缺陷下方并未形成剪切带。位于右边界缺陷上方的剪切带得到了充分的发展, 当其前端接近试样上端面时, 发生了剪切带折射现象, 然后贯通试样的左边界。启动于试样左边界缺陷附近的剪切带也得到了充分的发展, 当其前端接近试样上端面时, 也受到阻碍。

方案 9 与方案 8 的结果是基本类似的。所不同的是试样左边界缺陷附近的剪切带并不占优势。试样中仅出现一条倾斜的贯通试样两边界的剪切带, 发生脆性剪切破坏。

方案 8~10 的结果相类似。由于对于方案 10, 位于试样左、右边界上的缺陷几乎相对试样纵向对称线对称, 因此, 剪切带图案在某一发展阶段几乎是对称的, 见图 10(d)~图 10(f)。在随后的演化过程中, 最终启动于试样右边界缺陷附近的剪切带处于主导地位, 贯穿试样两边界, 试样发生脆性剪切破坏。

3.3 全程应力-变形曲线的离散性

由图 11 及图 12 容易发现, 与方案 4~6 相比, 方案 1~3 的应力-变形曲线的软化段最陡峭, 因此峰后行为倾向于脆性, 容易发生失稳破坏。与方案 6~8 相比, 其应力-变形曲线的软化段最陡峭, 因此, 方案 9、方案 10 的峰后行为倾向于脆性, 容易发生失稳破坏。

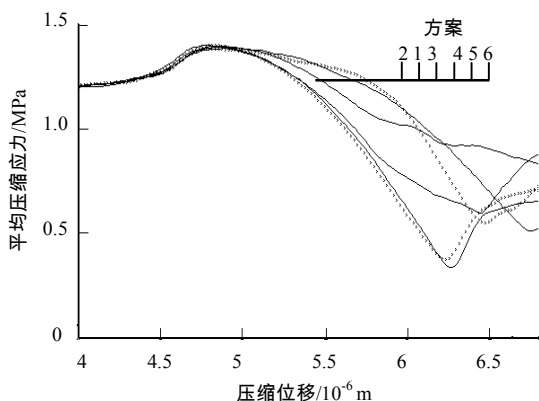


图 11 方案 1~6 的岩样上端面的应力-位移曲线
Fig.11 Complete stress-deformation curves in plane strain compression for schemes 1 to 6

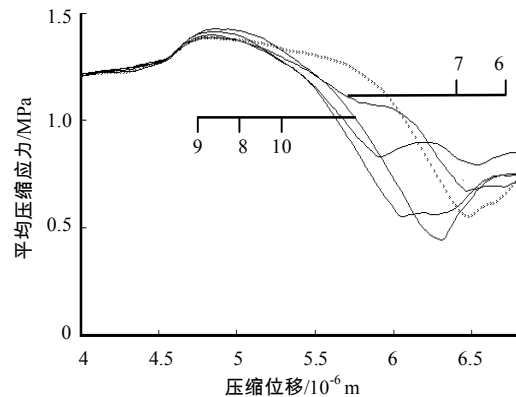


图 12 方案 6~10 的岩样上端面的应力-位移曲线
Fig.12 Complete stress-deformation curves in plane strain compression for schemes 6 to 10

3.4 剪切带图案与应力-变形曲线软化段的关系

从图 3、图 4、图 9、图 10 容易发现, 方案 1、方案 3 及方案 9、方案 10 的剪切带图案有共同的特点, 即: 剪切带数量较少 (通常都是 1 条), 而且由于端面的约束对剪切带的发展影响有限, 1 条剪切带可以同时贯通试样的左、右边界。这些特点与图 5~8 呈现的特点有很大不同。在图 5~8 中, 剪切带数量较多 (通常都是 2 条或 3 条), 而且由于受试样上或下端面的强烈约束, 并未出现 1 条剪切带同时贯通试样的左、右边界的的情况。

因此, 若试样的剪切带图案表现为剪切带数量较少且贯通试样两边界时, 应力-变形曲线软化段则呈现脆性; 反之, 呈现韧性。

4 结 语

当试样左、右边界上的缺陷距离较远时, 剪切带仅出现 1 条, 以通过两缺陷形式贯通试样两边界。当试样左、右边界上的缺陷距离较近时, 启动于缺陷附近的剪切带按各自其固有方向发展, 剪切带图案呈现十分复杂的花样。

当位于试样右边界上的缺陷距离试样上端面较近时, 由于上端面的约束, 仅位于缺陷下方的剪切带能得到充分的发展。当位于试样右边界上的缺陷距离试样上端面较远时, 由于下端面的约束, 仅位于缺陷上方的剪切带可得到充分的发展。

若剪切带数量较少且贯通试样两边界时, 试样发生脆性剪切破坏, 应力-变形曲线软化段比较陡峭。当剪切带数量较多且不出 1 条剪切带同时贯通试样的左、右边界时, 试样发生韧性剪切破坏,

应力-变形曲线软化段比较平缓。

当剪切带的前端迎面遇到试样上、下端面附近的上、下三角形区域时,由于端面的约束,剪切带的方向将发生改变。当剪切带的前端与试样的纵向对称线距离较近时,剪切带发生折射现象;当剪切带的前端与试样的纵向对称线距离较远时,剪切带将发生反射现象。

参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] 沈珠江. 理论土力学[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2000.
- [3] 蒋明镜, 沈珠江. 土体应变局部化(剪切带)的研究现状[A]. 第三届全国青年岩土力学与工程会议论文集[C]. 南京: [s.n.], 1998. 134 - 149.
- [4] 沈珠江. 应变软化材料的广义孔隙压力模型[J]. 岩土工程学报, 1997, 19(3): 14 - 21.
- [5] 蔡正银, 李相菰. 取决于材料状态的变形局部化现象[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(4): 533 - 538.
- [6] 周健, 池永. 砂土力学性质的细观模拟[J]. 岩土力学, 2003, 24(6): 901 - 906.
- [7] 钱建国, 黄茂松. 轴对称状态下土体剪切带触发形成的分叉理论[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(4): 400 - 404.
- [8] 赵吉东, 周维垣, 刘元高, 等. 岩石类材料应变梯度损伤模型研究及应用[J]. 水利学报, 2002, (7): 70 - 74.
- [9] 杨强, 陈新, 周维垣, 等. 拱坝的弹塑性局部化分析[J]. 水利学报, 2002, (12): 20 - 25.
- [10] 张洪武, 周雷, 黄辉. 含液各向异性多孔介质应变局部化分析[J]. 岩土力学, 2004, 25(5): 675 - 680.
- [11] 刘元高, 周维垣, 赵吉东, 等. 裂隙岩体局部化破坏多重势面分叉模型及其应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 23(3): 358 - 363.
- [12] 李蓓, 赵锡宏, 董建国. 上海粘土剪切带倾角的试验研究[J]. 岩土力学, 2002, 23(4): 423 - 427.
- [13] 董建国, 李蓓, 袁聚云, 等. 上海浅层褐黄色粉质粘土剪切带形成的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(1): 23 - 27.
- [14] 王学滨, 宋维源, 马剑, 等. 多孔介质岩土材料剪切带孔隙特征研究(1)——孔隙度局部化[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(15): 2514 - 2518.
- [15] 王学滨, 姚再兴, 马剑, 等. 多孔介质岩土材料剪切带孔隙特征研究(2)——最大孔隙比分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(15): 2 519 - 2 522.
- [16] 王学滨, 潘一山, 马瑾. 剪切带内部应变(率)分析及基于能量准则的失稳判据[J]. 工程力学, 2003, 20(2): 111 - 115.
- [17] 王学滨, 潘一山, 马瑾. 剪切带-弹性岩体系统的稳定及失稳滑动理论研究[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(3): 360 - 363.
- [18] 王学滨, 马剑, 刘杰, 等. 基于梯度塑性本构理论的岩样侧向变形分析(I): 基本理论及本构参数对侧向变形的影响[J]. 岩土力学, 2004, 25(6): 904 - 908.
- [19] 王学滨, 刘杰, 王雷, 等. 基于梯度塑性本构理论的岩样侧向变形分析(II): 尺寸效应及弹性回跳[J]. 岩土力学, 2004, 25(7): 1 127 - 1 130.
- [20] 王学滨, 潘一山, 丁秀丽, 等. 平面应变岩样局部化变形场数值模拟研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(4): 521 - 524.
- [21] 王学滨, 潘一山, 盛谦, 等. 岩石试件端面效应的变形局部化数值模拟研究[J]. 工程地质学报, 2002, 10(3): 233 - 235.
- [22] 王学滨, 潘一山, 盛谦, 等. 动力应变局部化传播及尺寸效应数值模拟[J]. 计算力学学报, 2002, 19(4): 500 - 503.
- [23] 王学滨, 潘一山, 丁秀丽, 等. 平面应变状态下岩石剪切带网络数值模拟研究[J]. 岩土力学, 2002, 23(6): 717 - 720.
- [24] 王学滨, 潘一山, 丁秀丽, 等. 孔隙流体对岩体变形局部化的影响及数值模拟研究[J]. 地质力学学报, 2001, 7(2): 139 - 143.
- [25] 王学滨, 潘一山, 盛谦, 等. 岩体假三轴压缩及变形局部化剪切带数值模拟[J]. 岩土力学, 2001, 22(3): 323 - 326.
- [26] 王学滨, 赵扬锋, 代树红, 等. 地震块体模型的共轭剪切破裂带数值模拟[J]. 防灾减灾工程学报, 2004, 24(2): 119 - 125.