

文章编号: 1006-6616 (2007) 03-0220-07

泊松比对岩样破坏模式及全部变形特征的影响

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: 利用编写的计算岩样全部变形特征的 FISH 函数, 采用 FLAC 模拟了泊松比不同时单缺陷岩石试样的破坏及全部变形特征。在峰前及峰后, 本构模型分别取为线弹性模型及莫尔库仑剪破坏与拉破坏复合的应变软化模型。高泊松比使岩样发生由单一剪切破坏向复杂破坏转变、破坏区域的面积增加、剪切带倾角降低, Coulomb、Roscoe 及 Arthur 理论对此无法解释。不同泊松比时计算得到的峰前应力一轴向应变曲线、应力一侧向应变曲线、侧向应变一轴向应变曲线、体积应变一轴向应变曲线的线性阶段与平面应变压缩条件下的线弹性解吻合。若泊松比超过 $1/3$, 通过计算得到的平面应变压缩泊松比可大于 0.5, 这被数值模拟确认。泊松比的增加使峰后的侧向应变一轴向应变曲线、体积应变一轴向应变曲线、计算得到的泊松比一轴向应变曲线变得不陡峭, 使峰后的应力一侧向应变曲线变得陡峭, 使破坏的前兆变得不明显。

关键词: 泊松比; 应变局部化; 前兆; 应力; 侧向应变; 体积应变

中图分类号: TU45

文献标识码: A

众所周知, 泊松比被定义为侧向应变与轴向应变的比值的绝对值。在均匀变形阶段, 泊松比是一个本构参数, 不依赖于应力或应变状态。

对于非均质的岩土材料, 其内部存在多种缺陷(微裂纹、孔洞等)。随着载荷的增加, 岩样内部的缺陷渐渐形核、聚结、长大, 联结成较大的裂纹, 直到形成穿透岩样的宏观断裂。在这一过程中, 为反映岩样的侧向变形特征, 需要引入一个类似泊松比的力学量。

由于岩样开始发生破坏的时刻(或应力水平)难于识别, 因而, 一些研究人员仍将通过测量得到的侧向应变与轴向应变的比值的绝对值称之为泊松比, 纵然岩样已经发生了破坏。他们发现有的时候泊松比的确大于 $0.5^{[1-5]}$ 。

文献[6]将单轴压缩条件下受到剪切破坏的岩样的应力峰值强度之后的侧向应变与轴向应变的比值的绝对值称之为峰后泊松比, 并得到了峰后泊松比的解析式。研究发现, 一般情况下, 峰后泊松比不是本构参数, 依赖于应力水平。通常, 峰后泊松比小于 1.4。

由于在实验研究中, 不能保证多个岩样仅泊松比不同, 而其它弹性及塑性本构参数则完全相同。因而, 从实验角度无法研究泊松比对岩样破坏过程、模式及全部变形特征的影响。

收稿日期: 2007-05-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(编号: 50309004)资助。

作者简介: 王学滨(1975-), 男, 副教授, 博士。研究方向: 工程材料(岩土、混凝土及韧性金属等)变形、破坏、稳定性理论研究及变形局部化的数值计算工作。E-mail: wxbb@263.net。

因此, 开展一定的理论研究和数值计算十分必要。文献[6~13]仅研究了单轴压缩条件下岩样受到剪切破坏时的全部变形特征、耗散能量及稳定性, 未涉及平面应变压缩条件下的全部变形特征的研究。

文献[14~16]采用拉格朗日元法 (FLAC) 内嵌语言 FISH 编写了计算平面应变压缩岩样全部变形特征的 FISH 函数, 研究了扩容角、软化模量及弹性模量对含单一材料缺陷岩样的破坏过程、模式、前兆及全部变形特征的影响。

本文利用上述 FISH 函数^[14~16], 计算了不同泊松比时岩样的全部变形特征, 研究了泊松比对平面应变压缩岩样破坏模式及全部变形特征的影响。

1 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。岩样的高度及宽度分别为 10 cm 及 5 cm, 下端面被固定铰支座约束, 在岩样的上端面施加常速度, $v_0 = 4 \times 10^{-10}$ m/时步, 计算在小变形模式及平面应变状态下进行。将岩样划分为若干正方形单元, 单元边长为 0.00125 m。为了得到不对称的剪切带图案, 在岩样的左下部预制了一个材料缺陷, 材料缺陷是四个空单元。另外, 岩样上端面的岩石质点仅允许向下运动, 其它方向的运动被限制, 这对应于上端面与试验机压头之间存在较大摩擦力的情形。

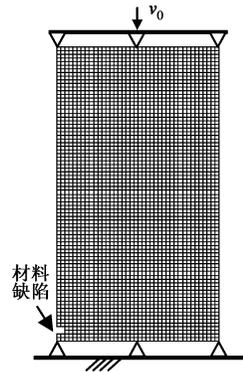


图1 模型的几何特征及边界条件

Fig 1 Model geometry and boundary conditions

在弹性阶段, 岩石的本构关系为线弹性, 本构参数包括弹性模量及泊松比。峰值强度后岩石的本构模型取为莫尔库仑剪破坏与拉破坏复合的应变软化模型, 抗拉强度取为 0.2 MPa。岩石内聚力、内摩擦角与塑性应变的关系见文献[14~15]。

数值计算采用 5 个计算方案, 在各个方案中, 弹性模量均设置为 26.6 GPa。

2 结果分析及讨论

2.1 泊松比对岩样破坏模式的影响

图2(a~p)给出了不同泊松比(ν)时, 岩样的破坏过程及模式。黑色单元表示这些单元已经发生了破坏; 白色单元表示这些单元尚处于弹性状态。各图片的时间步(t)也都已给出, 例如: 图2(e)的 t 为10 000。由各图片的 t , 易于计算出岩样此时的轴向(加载方向)应变(ϵ_a)。

见图2(a)、(e)、(i)及(m), 无论 ν 高或低, 塑性单元首先启动于材料缺陷附近。

当 ν 较低时, 见图2(a~h), 众多塑性单元按一定方向排列, 形成了一条狭长的剪切带; 随着时间步的增加, 剪切带的长度增加, 直到贯穿岩样的右侧面; 岩样仅发生了单一的剪切破坏。

当 ν 较高时, 见图2(i~p), 岩样发生破坏的单元数较多, 破坏模式比较复杂。

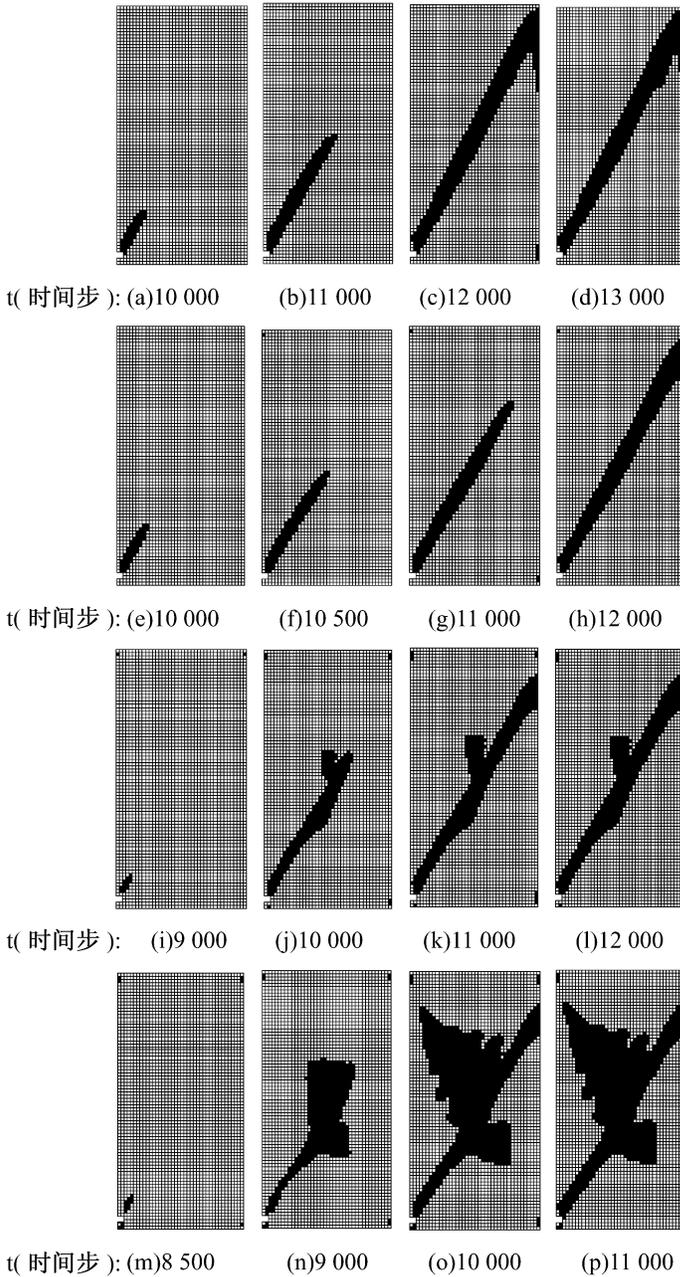


图 2 不同泊松比时试样破坏过程及模式

Fig 2 The failure processes and modes at different Poisson's ratios
(a~d) $\nu=0.07$; (e~h) $\nu=0.21$; (i~l) $\nu=0.31$; (m~p) $\nu=0.41$

经过测量, 图 2 (d)、(h)、(l) 及 (p) 的剪切带倾角 (剪切带的切向与水平方向所夹的锐角 θ) 分别为 64° 、 62° 、 60° 及 57° 。由此可见, 随着 ν 的增加, θ 降低。关于 θ 的理论解主要有 Coulomb、Roscoe 及 Arthur 倾角^[17,18]。上述理论解表明, θ 仅受摩擦角和扩容角影响。上述理论解无法考虑 ν 对 θ 的影响。当扩容角 $\psi=0$ 时, 根据 Coulomb、Roscoe 及 Arthur 倾角公式可以计算出 θ 分别为 67° 、 45° 及 56° 。本文的数值解与 Arthur 倾角最接近。

2.2 泊松比对应力—轴向应变曲线的影响

图 3~7 分别给出了 ν 对应力—轴向应变曲线、应力—侧向应变曲线、侧向应变—轴向应变曲线、通过轴向应变及侧向应变计算得到的泊松比—轴向应变曲线及体积应变—轴向应变曲线的影响。图 3~7 中的各黑点的位置表示此时应力的峰值强度刚好被分别达到。

见图 3, 随着 ν 的增加, 应力的峰值强度增加, 峰前的应力—轴向应变曲线变得陡峭。在平面应变线弹性状态下, 轴向压缩应变 $\epsilon_a = \sigma (1 - \nu^2) / E$, E 是弹性模量, σ 是轴向压缩应力。 σ 与 ϵ_a 的比值为 $E / (1 - \nu^2)$ 。因而, 随着 ν 的增加, 在平面应变线弹性阶段, 峰前的应力 (σ)—轴向应变 (ϵ_a) 关系变得陡峭。这与本文的数值解吻合。

见图 3, 峰后的应力—轴向应变曲线的斜率几乎不受 ν 的影响。

2.3 泊松比对应力—侧向应变曲线的影响

见图 4, 随着 ν 的降低, 应力的峰值强度所对应的侧向应变的大小降低。

见图 4, 随着 ν 的增加, 应力—侧向应变曲线的峰前阶段有变平缓的趋势。在平面应变线弹性状态下, 侧向应变 $\epsilon_l = -\sigma (\nu + \nu^2) / E$, 负号代表在压缩过程中侧向的膨胀。 $\sigma - \epsilon_l$ 关系的斜率的绝对值为 $E / (\nu + \nu^2)$ 。因而, 在平面应变线弹性状态下, 随着 ν 的增加, $\sigma - \epsilon_l$ 关系变得平缓。这与本文的数值解吻合。

见图 4, 随着 ν 的增加, 应力—侧向应变曲线软化段有变陡峭的趋势。

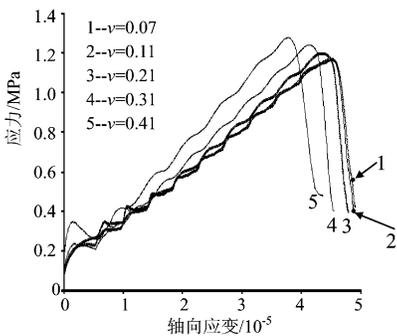


图 3 不同泊松比时应力—轴向应变曲线

Fig. 3 The stress-axial strains curves at different Poisson's ratios

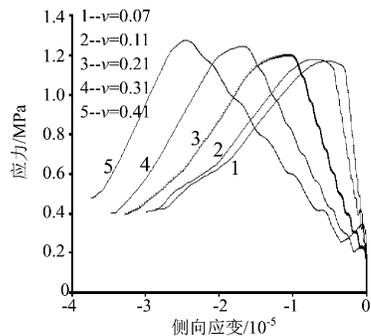


图 4 不同泊松比时应力—侧向应变曲线

Fig. 4 The stress-lateral strain curves at different Poisson's ratios

2.4 泊松比对侧向应变—轴向应变曲线的影响

见图 5, 随着 ν 的增加, 峰前的侧向应变—轴向应变曲线的线性阶段有变陡峭的趋势。在平面应变线弹性状态下, ϵ_l 与 ϵ_a 的比值的绝对值为 $\nu / (1 - \nu)$ 。随着 ν 的增加, 该绝对值增加, 因而, 上述数值模拟结果与平面应变状态下的线弹性解一致。

见图 5, 随着 ν 的增加, 峰后的侧向应变—轴向应变曲线有变平缓的趋势。

2.5 泊松比对计算的泊松比—轴向应变曲线的影响

见图 6, 不同 ν 时计算得到的泊松比—轴向应变曲线均可以划分为三个阶段^[14, 15]: 在第一个阶段, 泊松比不断增加; 在第二个阶段, 泊松比基本上保持不变; 在第三个阶段, 泊松比继续增加。第一阶段对应初始加载阶段; 第二阶段对应均匀变形阶段; 第三阶段大致对应峰后变形阶段。但是, 严格地讲, 第三阶段包括峰后变形阶段和峰前变形阶段的一小段。

见图 6, 在第一个阶段, ν 较高时的 $\nu - \epsilon_a$ 曲线较陡峭。在第一阶段, ν 持续增加的原因

详见文献 [14]、[15]。

见图 6，在第二个阶段， ν 较高时计算得到的泊松比较高。在平面应变线弹性状态下， ϵ_l 与 ϵ_a 的比值的绝对值 $\nu / (1 - \nu)$ 为通过 ϵ_l 及 ϵ_a 计算得到的泊松比。随着 ν 的增加， $\nu / (1 - \nu)$ 增加。因而，在均匀变形阶段， ν 较高时计算得到的泊松比较高的结论是合理的。假定 $\nu / (1 - \nu) > 0.5$ ，可以得到 ν 应大于三分之一。也就是说，若 $\nu > 1/3$ ，则在第二阶段通过 ϵ_l 及 ϵ_a 计算得到的泊松比可以大于 0.5。从图 6 的数值计算结果中也可以发现这一点，当 $\nu = 0.31 < 1/3$ 时，计算得到的泊松比小于 0.5；而当 $\nu = 0.41 > 1/3$ 时，计算得到的泊松比已大于 0.5。

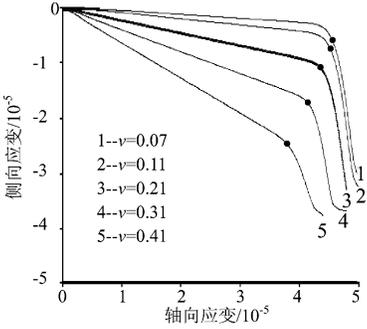


图 5 不同泊松比时侧向应变—轴向应变曲线

Fig 5 The lateral strain-axial strain curves at different Poisson's ratios

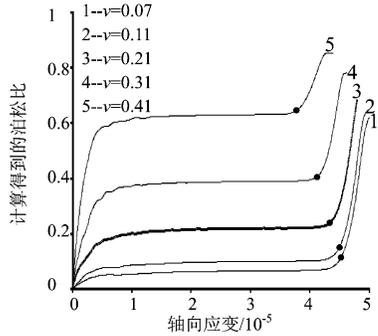


图 6 不同泊松比时计算得到的泊松比—轴向应变曲线

Fig 6 The calculated Poisson's ratio-axial strain curves at different Poisson's ratios

假定 $\nu / (1 - \nu) > 1$ ，可以得到 $\nu > 0.5$ ，这是不可能的。因而，在均匀变形阶段，通过 ϵ_l 及 ϵ_a 计算得到的泊松比不可能大于 0.5。上述结论是在不含有孔隙水压力条件下得到的，若有孔隙水压力作用，在均匀变形阶段，岩样的侧向膨胀效应将十分显著，这样，通过 ϵ_l 及 ϵ_a 计算得到的泊松比也可能大于 0.5。

见图 6，在应力的峰值强度之后， ν 较高时的 $\nu - \epsilon_a$ 曲线较平缓。最终，通过 ϵ_l 及 ϵ_a 计算得到的泊松比的最大值都已经超过 0.5。在单轴压缩条件下，当剪切带切向与轴向压应力的夹角小于 35° 时，岩样（高宽比为 2:1）的峰后泊松比可以达到 1.4^[6]。

2.6 泊松比对体积应变—轴向应变曲线的影响

见图 7，随着 ν 的增加，体积应变—轴向应变曲线的峰值及所对应的轴向应变均降低。这说明， ν 较小时，岩样可以达到的最小体积为最小。

见图 7，峰前的线性体积应变—轴向应变曲线的斜率随着 ν 的增加而降低。在平面应变线弹性状态下，体积应变 $\epsilon_v = \epsilon_a + \epsilon_l$ ，因此，可以得到 $\epsilon_v = \sigma (1 - \nu - \nu^2) / E$ 。 $\epsilon_v - \epsilon_a$ 关系的斜率为 $1 - \nu / (1 - \nu)$ 。因而，上述数值结果是合理的。

见图 7，在应力的峰值强度之后， ν 较高时的 $\epsilon_v - \epsilon_a$ 曲线较平缓。

2.7 泊松比对破坏前兆的影响

由于图 3 及图 4 给出的应力—轴向应变曲线及应力—侧向应变曲线在峰前具有一定的波动性，因此很难在峰前识别出岩样破坏的前兆。从图 5~7 给出的 3 种曲线可以发现，在峰前，3 种曲线均发生了一定程度的转折，这些转折可视为岩样破坏的前兆。

随着 ν 的降低, 3 种曲线在峰前发生的转折(偏离线性状态)程度越来越大, 因此, 岩样破坏的前兆随着 ν 的降低而增强。

3 结论

高泊松比使岩样的破坏模式由单一剪切破坏向复杂破坏模式转变, 破坏区域的面积增加, 剪切带倾角降低, Coulomb、Roscoe 及 Arthur 理论不能解释这一现象。

在峰前, 不同泊松比时计算得到的应力—轴向应变曲线、应力—侧向应变曲线、侧向应变—轴向应变曲线、体积应变—轴向应变曲线的线性阶段与平面应变压缩条件下的弹性解吻合。

理论结果表明, 如果采用的泊松比超过 $1/3$, 通过轴向应变及侧向应变计算得到的平面应变压缩泊松比可以大于 0.5, 这一点被数值模拟确认。

泊松比的增加使峰后的侧向应变—轴向应变曲线、体积应变—轴向应变曲线、计算得到的泊松比—轴向应变曲线变得不陡峭, 峰后的应力—侧向应变曲线变得陡峭。

泊松比的降低使侧向应变—轴向应变曲线、体积应变—轴向应变曲线、泊松比—轴向应变曲线在应力峰值强度之前发生的转折程度变大, 因而, 岩样破坏的前兆逐渐增强。

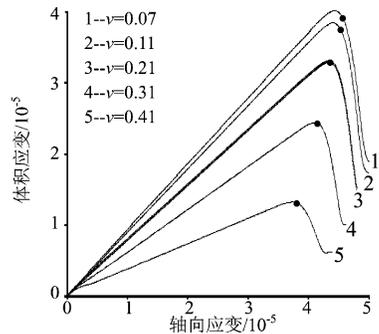


图7 不同泊松比时体积应变—轴向应变曲线

Fig. 7 The volumetric strain-axial strain curves at different Poisson's ratios

参 考 文 献

- [1] 范庆忠, 高延法. 分级加载条件下岩石流变特性的试验研究 [J]. 岩土工程学报, 2005, 27 (11): 1273~1276.
- [2] 朱俊高, 卢海华, 殷宗泽. 土体侧向变形性状的真三轴试验研究 [J]. 河海大学学报, 1995, 23 (6): 28~33.
- [3] 朱建明, 徐秉业, 岑章志. 岩石类材料峰后滑移剪胀变形特征研究 [J]. 力学与实践, 2001, 23 (5): 19~22.
- [4] 孙益振, 邵龙谭. 基于局部与整体变形测量的粉土泊松比试验研究 [J]. 岩土工程学报, 2006, 28 (8): 1033~1038.
- [5] Gold LW. On the elasticity of ice plates [J]. Canada Journal of Civil Engineering, 1988, 15 (6): 1080~1084.
- [6] 王学滨. 岩样单轴压缩峰后泊松比理论研究 [J]. 工程力学, 2006, 23 (4): 99~103.
- [7] 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.
- [8] 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): 尺寸效应及弹性会跳 [J]. 岩土力学, 2004, 25 (7): 1127~1130.
- [9] 王学滨. 岩样单轴压缩轴向及侧向变形耗散能量及稳定性分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24 (5): 846~853.
- [10] 王学滨, 潘一山. 基于梯度塑性理论的岩样单轴压缩扩容分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23 (5): 721~724.
- [11] 王学滨. 单轴压缩岩样轴向回跳及侧向回跳理论研究 [J]. 岩土力学, 2006, 27 (3): 414~417.
- [12] Wang Xuebin. Analytical solution of complete stress-strain curve in uniaxial compression based on gradient-dependent plasticity [A]. In: Eurock 2005-Impact of Human Activity on the Geological Environment [C]. Taylor & Francis Group, London, 2005, 661~667.
- [13] Wang XB. Unified instability criterion for quasibrittle material in uniaxial tension, direct shear and uniaxial compression subjected

- to shear failure [A]. In: Euro-C Conference 2006-Computational Modelling of Concrete Structures [C]. Taylor & Francis Group, London, 2006. 467~472.
- [14] 王学滨. 剪胀对岩样全部变形特征的影响 [J]. 四川大学学报 (工程科学版), 2005, 37 (5): 25~30.
- [15] 王学滨. 软化模量对岩样全部变形特征的影响 [J]. 岩土工程学报, 2006, 28 (5): 600~605.
- [16] 王学滨. 弹性模量对岩样破坏前兆及全部变形特征的影响 [J]. 岩土力学, 2006, 27 (增): 559~563.
- [17] Vardoulakis I. Shear band inclination and shear modulus of sand in biaxial tests [J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 1980, 4 (2): 103~119.
- [18] Vemmer PA. The orientation of shear bands in biaxial tests [J]. Géotechnique, 1990, 40 (2): 223~236.

EFFECTS OF POISSON'S RATIO ON FAILURE MODE AND OVERALL DEFORMATIONAL CHARACTERISTICS OF A ROCK SPECIMEN

WANG Xue-bin

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

Abstract: Using FISH functions written in FLAC to calculate the overall deformational characteristics, the effects of Poisson's ratio in the elastic stage on the failure mode and overall deformational characteristics were modeled for a rock specimen with a material imperfection in plane strain compression. In the elastic stage, the adopted constitutive relation of rock was linear elastic; and in the strain-softening stage, a composite Mohr-Coulomb criterion with tension cut-off was used and the post-peak constitutive relation was also linear. The increased Poisson's ratio in the elastic stage leads to a transition of failure mode from single to complex shear fractures and a larger failed area is expected. The predicted shear band inclination is lower at a higher Poisson's ratio in the elastic stage, which cannot be explained by Coulomb, Roscoe and Arthur theories. Prior to the peak stress, the calculated slopes of the linear stress-axial strain curves, stress-lateral strain curves, lateral strain-axial strain curves and volumetric strain-axial strain curves at different Poisson's ratios in the elastic stage are consistent with the linear elastic solutions in plane strain compression. The calculated Poisson's ratio in plane strain compression is higher than 0.5 if the adopted Poisson's ratio in the elastic stage exceeds 1/3, as is confirmed by the present numerical simulation. At a higher Poisson's ratio in the elastic stage, the post-peak lateral strain-axial strain curve, volumetric strain-axial strain curve and calculated Poisson's ratio-axial strain curve become less steep; whereas the post-peak stress-lateral strain curve becomes steep and the precursor to failure is less apparent.

Key words: Poisson's ratio; strain localization; precursor; stress; lateral strain; volumetric strain