

三应力不变量模型预测变形带角

李云祯^{1,2}, 黄涛¹, 戴本林³, 蔡臣¹

(1. 西南交通大学环境科学与工程学院, 成都 610031; 2. 美国西北大学土木与环境工程系, Evanston, IL 60208; 3. 河海大学环境科学与工程学院, 南京 210098)

摘要: RR 二应力不变量模型研究岩石局部化变形带角, 得到的预测值与实验中测得的变形带角随平均应力增加而增加的趋势以及随着最小压应力增加而减小的趋势都一致, 但是得到的预测值比实测数据略小。在 RR 二应力不变量模型基础上, 通过增加洛德角作为第三应力不变量, 选用更加复杂的屈服条件, 得到的三应力不变量模型, 结合岩石真三轴实验, 得到的预测值和实验数据关联度更高。

关键词: 岩石局部化变形; 变形带角; RR 二应力不变量模型; 三应力不变量模型

中图分类号: TU458.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-4764(2010)03-0063-06

Localization Band Angle Prediction With Three-invariant Model

LI Yun-zhen^{1,2}, HUANG Tao¹, DAI Ben-lin³, CAI Chen¹

(1. School of Environmental Science and Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, P. R. China;
2. Civil and Environment Engineering, Northwestern University, Evanston, IL 60208 U. S. A;
3 College of Environmental Science & Engineering, Hehai University Nanjing 210098, P. R. China)

Abstract: The prediction with RR's two invariant Model are smaller than the data, while it can catch the trend of linear increase in band angle with increasing mean stress for fixed values of the least compressive stress and a decrease with increasing values of the least compressive stress. Based on the RR's two invariant Model, with a Lode angle as the third invariant and the more complicated yield condition, true triaxial compression test was carried out. And three-invariant model was proposed in good agreement between real data and predictions.

Key words: localization deformation; band angle; RR two invariant model; three invariant model

局部化变形是地壳和岩石圈中普遍存在的主要构造类型之一,可以在不同层次、不同类型下发育,其尺度可从超显微的晶格位错到造山带或变质基底,绵延几十公里宽和上千公里长。局部化变形中剪切带通常是岩体断裂和失稳的前兆,常引起滑坡等地质灾害,是引发地震的诱因;局部化变形压缩带由于可以明显降低岩石的渗透性能,起到岩层中流体流动的管道或者障碍作用^[1-2],在石油和天然气的储藏和运输^[3]、含水层的管理和二氧化碳的地质储存方面^[4]都有很高的利用价值,可以带来很好的

经济、环境和社会效应。由于岩石局部化变形与石油开采以及一些突发性灾害有密切联系,因而受到广泛关注,一直以来都是岩石力学、岩石物理和本构模型研究的热点之一^[5]。

最初的变形带角预测理论是摩尔库伦准则,由于其不考虑中主应力对岩石变形的影响,因此得到广泛的应用。但是这种不依赖于中间主应力的预测不能解释实验中得到的变形带角在轴对称拉伸状态和轴对称压缩状态不同的现象。Rudnicki 和 Rice (1975) 在 Hadamard (1903)、Mandel (1966)、

收稿日期: 2009-09-24

基金项目: 留学回国人员科研启动基金资助(教外司留[2007]24)

作者简介: 李云祯(1979-),男,博士生,主要从事工程水环境效应及其控制研究,(E-mail)zhenyun99@126.com。

Thomas(1961)和 Hill(1962)的研究基础上,发展了基于塑性力学的局部化分叉分析,建立了从均匀变形中分化的非单一或分叉模型,研究岩石中的局部化变形,但是其预测得到的变形带角值比实测值略小,而且关联度不高。该文在 RR 二应力不变量模型基础上,增加洛德角作为第三应力不变量,选用更加复杂的屈服条件,得到三应力不变量模型,结合岩石真三轴实验数据,得到的预测值和实验数据关联度更高,且有随平均应力增加而增加的趋势以及随着最小压应力增加而减小的趋势都一致。用分叉理论研究高孔隙岩石的局部化变形,对于理解和认识地壳的变形规律以及地壳中发生的各种地质作用过程、整个岩石圈构造及全球构造动力学方面具有重要的理论与实际意义。同时,它使岩石物理学家深刻地体验和认识到地质作用和地壳变形过程与岩石本构模型的密切关系,启示人们如何将岩石本构关系运用于研究实际的地质作用和地壳变形过程^[6]。

1 破坏角预测 RR 理论

RR 理论认为岩石局部化变形是均质变形的一个分叉^[7],给出了一种关于高孔岩石局部化变形破坏角预测的普通形式(率无关,弹性各向同性)的非弹性本构方程,包括了一个光滑的屈服面(屈服面是发生弹性变形的边界)和塑性势面(给出了应力空间中塑性增量的方向)^[8]。

屈服面是纯弹性应力状态的边界,塑性势是关于应力的偏导数为塑性应变增量的方向。如果 F 和 G 相等,则称流动法则^[9]与屈服面相关,并且塑性增量的方向与屈服面垂直。从实际观测中可知,这种情况只在金属材料中出现,而在岩土或者其他颗粒状物质材料中不会出现^[10]。所以一般情况下,两者不相等。应力空间中非弹性应变增量的方向和塑性势面 $P_{ij} = \partial G / \partial \sigma_{ij}$ 的法线方向一致,屈服面的法线是 $Q_{ij} = \partial F / \partial \sigma_{ij}$,和塑性势的法线方向不一致^[11]。作为结论,屈服面和塑性势法线方向的偏斜张量部分是一样的,即 $P_{ij}' = Q_{ij}'$,撇代表偏斜张量部分,而且 $G_{\tau} = F_{\tau}$, $G_{\theta_L} = F_{\theta_L}$ 。

RR 理论得到的预测带角是一种基于二不变量模型的表达式,依赖的 2 个应力不变量为:平均正应力 $\sigma = -(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) / 3$ 和 Mises 等价应力 $\tau = \sqrt{s_{kl}s_{kl}} / 2$,其中 $s_{ij} = \sigma_{ij} - (\sigma_{kk} / 3)\delta_{ij}$ 是应力的偏部分,由此得到的变形带角预测公式是:

$$\theta_{RR} = \frac{\pi}{4} + \frac{1}{2} \arcsin \alpha \quad (1)$$

其中,

$$\alpha = \frac{(2/3)(1+\nu)(\beta+\mu) - (s_2/\tau)(1-2\nu)}{\sqrt{4-3(s_2/\tau)^2}} \quad (2)$$

式(2)中, ν 为泊桑比, $\mu = -3f'(\sigma)$ 为屈服面的斜率; $\beta = -3g'(\sigma)$ 为膨胀系数,等于体积应变(膨胀为正)的塑性增量与剪切应变的塑性增量的比值; s_2 是第二偏应力不变量,与洛德角 θ 的关系是 $s_2/\tau = 2\sin \theta / \sqrt{3}$ 。

利用以上二应力不变量模型对 Mogi 的 Dunham 白云岩^[12-13]以及 Haimson 的砂岩真三轴实验数据^[14]进行研究,预测得到的结果虽然与固定最小压缩应力情况下,变形带角随平均正应力增加而增加的趋势以及随着最小压应力增加而减小的趋势都一致,但是得到的变形带角值比实测值略小,而且关联度不高(如图 1)。

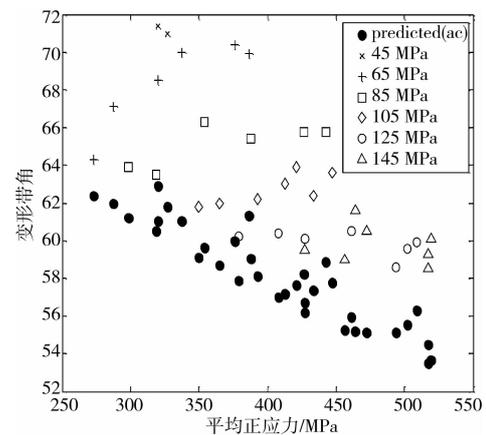


图 1 预测数据(实心)和 Dunham 白云岩实验数据(空心)比较

2 三应力不变量屈服面表达式

根据图 1,可以看出预测值与实验中测得的变形带角随平均应力增加而增加的趋势以及随着最小压应力增加而减小的趋势都一致,但是得到的预测值比实测数据略小。这就需要选用更加复杂的弹塑性本构模型和屈服条件来改进预测,提高预测值与实测值之间的关联度。根据经典塑性力学^[15],选用一般形式的三应力不变量屈服面,其表达式为:

$$F(\tau, \sigma, \theta) = -\sqrt{\frac{4}{27}} A \sin(3\theta) \left(\frac{\tau}{\tau_0}\right)^3 + \left(\frac{\tau}{\tau_0}\right)^2 - 1 = 0 \quad (3)$$

其中: $0 \leq A \leq 1$

如果令 $\tau_0 = -\sigma \sqrt{(k_{LD} - 27)/k_{LD}} / 3$, $A = \sqrt{(k_{LD} - 27)/k_{LD}}$ 代入(3)式就会得到 Lade-Duncan 屈服面法则^[16];当令 $\tau_0 = -\sigma \sqrt{(k_{MN} - 9)/(k_{MN} - 3)} / 3$, $A = \sqrt{3k_{MN}^2(k_{MN} - 9)/(k_{MN} - 3)^3}$ 则得到 Matsuoka-

Nakai 屈服面法则^[17]。

3 三应力不变量模型

当确定岩石局部化变形破坏角预测理论时,最重要的是定义描述屈服面和塑性势面的表达式。屈服面是导致弹性或非弹性变形应力状态的边界;塑性势是与非弹性塑性增量向量垂直的面。屈服面控制由加载导致的非弹性应变增量的大小,塑性势控制非弹性应变增量的方向。一旦屈服面和塑性势面的表达式确定,根据经典塑性力学,一种相容条件和流动法则用来确定控制材料变形行为的应力-应变关系。应力-应变关系的获得依赖于初始假设的屈服面和塑性势面的表达式。因此,需要首先考虑对屈服面和塑性势面有影响的各种因素^[18-19]。

在 Rudnicki 和 Rice(1975)二应力不变量模型中,由于把 β 和 μ 看做一个整体作为参数进行预测,影响了预测结果的精确程度。Mogi 试验中测得的破坏应力的方向和 3 个主应力都有关,这表明基于应力不变量的预测要优于基于主应力自身的预测^[19]。该文选用增加一个应力不变量:洛德角 $\theta =$

$$\frac{1}{3} \arcsin\left(-\frac{\sqrt{27}J_3}{2\tau^3}\right)$$

其中, $J_3 = \det(s_{ij})$ 是偏应力 $s_{ij} = \sigma_{ij} - (\sigma_{kk})\delta_{ij}$ 的第三不变量^[20-21]到 RR 二不变量模型中,建立三应力不变量模型。则屈服面和塑性势面的表达式为:

$$F(\sigma, \tau, \theta) = 0 \quad (4)$$

$$G(\sigma, \tau, \theta) = 0 \quad (5)$$

屈服面的法线方向是:

$$Q_{ij} = \frac{\partial F}{\partial \sigma_{ij}} = F_\tau \frac{\partial \tau}{\partial \sigma_{ij}} + F_\sigma \frac{\partial \sigma}{\partial \sigma_{ij}} + F_\theta \frac{\partial \theta}{\partial \sigma_{ij}} \quad (6)$$

其中:

$$\frac{\partial \theta}{\partial \sigma_{ij}} = -1/\tau \left\{ \sqrt{3}(s_{ik}s_{kj} - 2\delta_{ij}\tau^2/3)/(2\tau^2 \cos 3\theta) + \tan 3\theta \delta_{ij}/2\tau \right\} \frac{\partial \tau}{\partial \sigma_{ij}} = s_{ij}/\tau, \frac{\partial \sigma}{\partial \sigma_{ij}} = \delta_{ij}, \frac{\partial J_3}{\partial \sigma_{ij}} = s_{ik}s_{kj} - 2\delta_{ij}\tau^2/3$$

因此(6)式变为:

$$Q_{ij} = F_\tau \frac{s_{ij}}{2\tau} + F_\sigma \delta_{ij} +$$

$$F_\theta \frac{1}{\tau} \left\{ \frac{\sqrt{3}(s_{ik}s_{kj} - 2\delta_{ij}\tau^2/3)}{2\tau^2 \cos 3\theta} + \tan 3\theta \frac{s_{ij}}{2\tau} \right\} \quad (7)$$

因为屈服面和塑性势法线方向的偏斜张量部分是一样的,即 $P'_{ij} = Q'_{ij}$,所以得到:

$$F_\tau = G_\tau, F_\theta = G_\theta \quad (8)$$

因此,屈服面函数和塑性势的函数只存在 F_σ 和 G_σ 的区别,计算 $2Q'_{ij}Q'_{ij}$ 得到:

$$2Q'_{ij}Q'_{ij} = F_\tau^2 + (F_\theta/\tau)^2 \quad (9)$$

接下来用 $P_{kk}/2 \sqrt{Q'_{ij}Q'_{ij}/2}$ 、 $Q_{kk}/2 \sqrt{Q'_{ij}Q'_{ij}/2}$ 和 $Q'_{22}/2 \sqrt{Q'_{kl}Q'_{kl}/2}$ 分别替换式(2)中的 β 、 μ 和 s_2/τ ,然后结合式(8)和(9)得到三应力不变量模型的变形带角预测公式:

$$\alpha = \frac{\sqrt{3}(1+\nu)\cos\varphi(F_\sigma + G_\sigma) - (1-2\nu)\sin(\varphi + \theta)F_\tau}{\sqrt{3}F_\tau \cos(\varphi + \theta)} \quad (10)$$

其中 $\varphi = \arctan(F_\theta/\tau F_\tau)$ 是偏平面内屈服面的法线方向与径向矢量的夹角。

4 实例验证

在该节,用屈服条件(3)和三应力不变模型(10)研究 Mogi 的轴对称拉伸、压缩实验得到的 Dunham 白云岩数据以及 Haimson 的砂岩真三轴实验数据,得到岩石局部化变形破坏角的预测值,与实验测得数据进行比较。由于关于岩石屈服面演变的数据很少,这里选用的岩石破坏数据大致上和处于应力应变曲线的峰值数据一致。

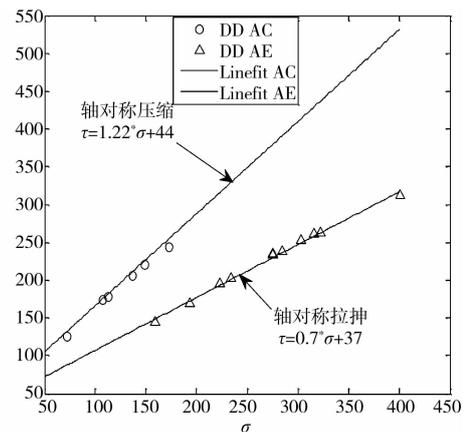


图 2 Dunham 白云岩轴对称压缩和拉伸的 $\tau - \sigma$ 关系图, τ 是 Mises 等效应力, σ 是平均正应力。AC 代表轴对称压缩,AE 代表轴对称拉伸。

图 2 是关于 Dunham 白云岩轴对称拉伸和压缩的 $\tau - \sigma$ 图。压缩和拉伸的拟合直线斜率不同表明了变形带角对洛德角 θ 的依赖。轴对称压缩时, τ 由 $t_{AC}\tau_0(\sigma)$ 给出, t_{AC} 是当 $\theta = \frac{\pi}{6}$ 时式(8)的根。同样,轴对称拉伸时, τ 由 $t_{AE}\tau_0(\sigma)$ 给出, t_{AE} 是当 $\theta = -\frac{\pi}{6}$ 时式(8)的根。线性变化表示把 A 取为常量和 $\tau_0(\sigma)$ 为线性是足够的:

$$\tau_0(\sigma) = \tau_{00} + \tau_{01}\sigma \quad (11)$$

其中 τ_{00} 和 τ_{01} 是图 3 中轴对称压缩数据除以 t_{AC} 直线的截距和斜率。选择 $A = 0.6$, 则 t_{AC}/t_{AE} 的值和图 1 中 2 条直线斜率的比值相等。

图 3 是 Mogi 设计的 Dunham 白云岩轴对称实验数据以及 Haimson 的砂岩真三轴实验数据。真三轴实验是先给岩石样本施加同样的静水压力 σ_1 , 然后增大其中 2 个到 $\sigma_2 = \sigma_3$, 最后增大 σ_3 至发生破坏。图 3 中的直线表示了 $A = 0.6$ 时的轴对称压缩、拉伸和纯剪应力状态的预测值。虽然 $\tau_0(\sigma)$ 由轴对称压缩的数据固定, 但是轴对称拉伸的截距比实验测得数据稍大, 也就是说, 轴对称拉伸的点在图 3 中的线的下方。

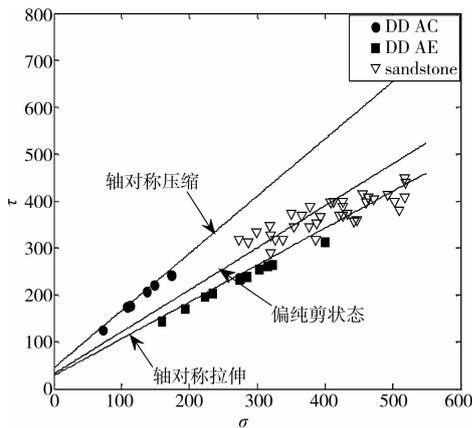


图 3 Dunham 白云岩轴对称实验数据以及 Haimson 的砂岩真三轴实验数据的 $\tau - \sigma$ 图。直线是 $A = 0.6$ 和 θ 分别等于 $\pi/6, 0$, 和 $-\pi/6$ 时的预测拟合线

图 4 是 Mogi 轴对称压缩和拉伸实验测得的变形带角与平均正应力以及线性拟合直线图。式(10)中的 F_τ 和 F_θ 可以通过(8)很容易得到。 $A = 0.6$, 那么只有 τ_0 依赖于 σ , 则有:

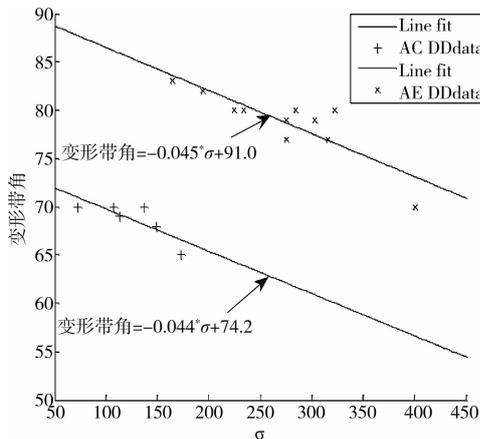


图 4 Dunham 白云岩实验测得的变形带角和平均正应力关系图, “x”代表轴对称拉伸实验数据, “+”代表轴对称压缩实验数据

$$F_\sigma = \frac{1}{\tau_0} \frac{d\tau_0}{d\sigma} \left[\left(\frac{\tau}{\tau_0} \right)^2 - 3 \right] \quad (12)$$

其中 $\frac{\tau}{\tau_0}$ 的比值依赖于 θ 。式(10)中的 G_σ 不知道, 但是可以由轴对称压缩和拉伸实验中测得的变形带角连同 $\frac{d\tau_0}{d\sigma}$ 求得。换句话说, 用式(10)和图 4 中线性拟合的变形带角数据可以得到 2 个线性方程来解得 G_σ 和 $\frac{d\tau_0}{d\sigma}$, 结果在图 5 中显示。根据 $\frac{d\tau_0}{d\sigma}$ 和 σ 的推断和图 2 中显示的线性变量 $\tau_0(\sigma)$ 不一致, 这些差异是由于前面提到的用破坏的数据近似作为屈服面变量的原因。

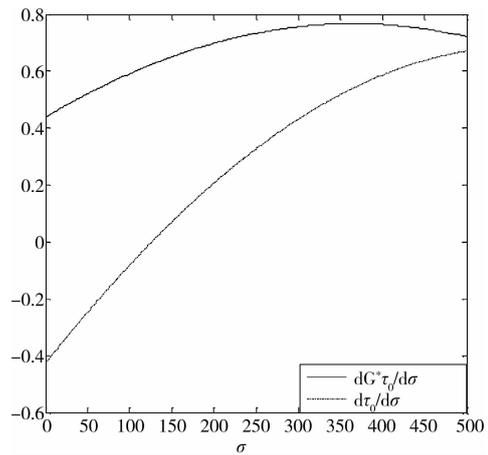


图 5 式(10)结合图 4 中的轴对称压缩和拉伸数据拟合线推导出的 $d\tau_0/d\sigma$ 和 $\tau_0 dG/d\sigma$ 得变化曲线

图 6 比较了作为洛德角 θ 函数的变形带角预测值和观测值, 关联度很好达到了 0.93。图 7 比较了作为平均正应力函数的变形带预测值和观测值, 注意到预测值大体上与变形带角随着中间主应力的增加而增加, 随着平均压应力的增加而减小的趋势一致。

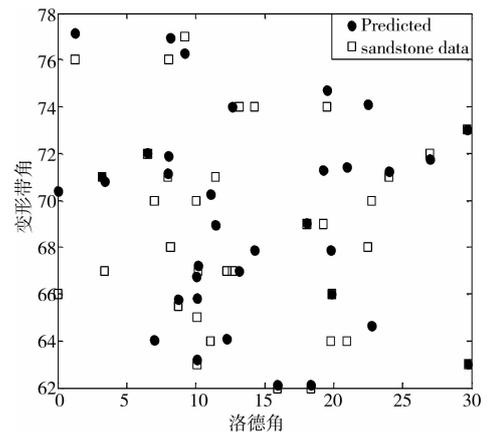


图 6 预测值(实心)和观测到的变形带角(方格)比较, 横轴是洛德角

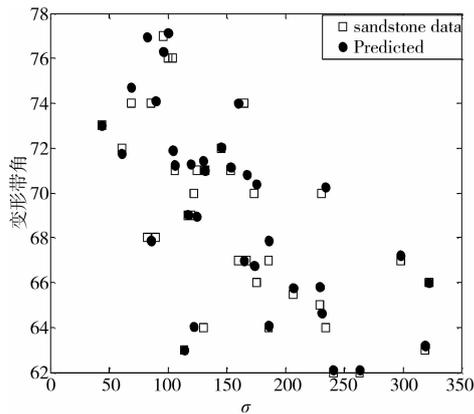


图7 同于图6,横坐标为平均正应力 σ

5 结论

真三轴实验的数据提供了研究岩石三维形式本构关系的机会。轴对称压缩和拉伸实验可用用来推断偏应力和平均应力的行为。通过选用较为复杂的屈服面形式,结合 Rudnicki 和 Rice(1975)二应力不变量模型,得到了三应力不变量岩石局部化变形破坏角预测模型。用基于三不变量模型的分叉理论预测变形带角是对基于二不变量模型的改进。用得到的模型分析了 Mogi 的 Dunham 白云岩轴对称拉伸、压缩实验以及 Haimson 砂岩真三轴实验得到的数据,得到的预测值和实验测得的值进行了对比,发现预测值和实验测得数据吻合很好。

在最近的研究中,Olsson 和 Holcomb 用声发射技术来追踪压缩带变形的形成和发生,结论可以用来识别局部化变形的开始以及决定局部化变形初期的材料参数值,这些值可以用来评价局部化变形的预测,提供改良模型的机会^[23-24]。但是由于岩石是一种复杂的自然地质体。在漫长的地质年代里,岩石经历了结晶过程的演化、高温高压的影响、以及各种地质营造力的作用,造成了岩石在结构和构造上都有极其复杂的特性,因而给岩石各种物理力学性质的深入研究带来了难题。进一步的实验可以很好的验证现有的理论研究,岩石材料局部化变形前后相关的平均应力,以及中主应力和最大、最小主应力都需要发展本构方程来研究。因此决定怎样应用现有的实验数据和理论去研究、模拟和预测现场中的岩石局部化变形带形成给广大科研工作者提供了很多研究机会。

致谢:在该文成文过程中,美国西北大学合作导师 Rudnicki J W 给予了很大的支持和悉心的理论指

导,特此表示感谢!

参考文献:

- [1] WAWERSIK W R, RUDNICKI J W, DOVE P HARRIS J, et al. Terrestrial sequestration of CO₂: an assessment of research needs[C]//In Dmowska R (eds) Advances in geophysics, Vol. 43, 2002. Academic, New York: 97-117.
- [2] 席道瑛,杜赞,李廷,等.高孔隙岩石局部变形带的理论和形成条件研究进展[J].岩石力学与工程学报,2008,27(S2):3889-3890.
XI DAO-YING, DU YUN, LI TING, et al. Research progress in theory and forming condition of localized deformation bands in high porosity rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(S2):3889-3890.
- [3] OLSSON W A, HOLCOMB D J, RUDNICKI J W. Compaction localization in porous sandstone: implications for reservoir mechanics [J]. Oil and Gas Science and Technology, 2002, 57(5):591-599.
- [4] STERNLOF K R, J R CHAPIN, D D POLLARD, et al. Permeability effects of deformation band arrays in sandstone [J]. American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 2004, 88:1315-1329.
- [5] STERNLOF K R, M KARIMI-FARD D D, et al. Flow effects of compaction bands in sandstone at scales relevant to aquifer and reservoir management[J]. Water Resources Research, 2006, 42:139-152.
- [6] 王宝善,李娟,陈颀.高孔隙岩石局部化变形研究新进展[J].地球物理学进展,2004,19(2):222-229.
WANG BAO-SHAN, LI JUAN, CHEN YONG. Advances of research on localized deformation in porous rocks[J]. Progress in Geophysics, 2004, 19(2): 222-229.
- [7] RUDNICKI J W, RICE J R. Conditions for the localization of deformation in pressure-sensitive dilatant materials[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1975, 23: 371-394.
- [8] RUDNICKI J W. Localized failure in brittle rock[C]// Proceedings of the 3rd International Symposium GeoProc2008, Wiley:25-40.
- [9] RICE J R. The localization of plastic deformation[C]// Theoretical and Applied Mechanics. Proceedings of the 14th International Congress on Theoretical and Applied Mechanics, 1976.
- [10] RUDNICKI J W, W A OLSSON. Reexamination of fault angles predicted by shear localization theory[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, 1998, 35:512-523.

- [11] HILL R. Acceleration waves in solids[J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 1962, 10:1-16.
- [12] MOGI K. *Experimental rock mechanics* [M]. London, UK: Taylor & Francis Group, 2007, 3: 522-528.
- [13] MOGI K. Effect of the intermediate principal stress on rock failure[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1967, 72(20): 5117-5131.
- [14] OKU H, HAIMSON B, SONG S R. True triaxial strength and deformability of the siltstone overlying the Chenlungpu fault (Chi-Chi earthquake) Taiwan [J]. *Geophysical Letters*, 2007, 34: 306-315.
- [15] HILL R. *The mathematical theory of plasticity* [M]. Oxford Engineering Science Series, Oxford, London, 1961.
- [16] LADE P V, DUNCAN J M. Elastoplastic stress-strain theory for cohesionless soil [J]. *J. Geotech. Engrg. Div.*, ASCE, 1975, 101: 1037-1053.
- [17] MATSUOKA H, T NAKAI. Stress-deformation and strength characteristics of soil under three different principal stresses [J]. *Proc. Japan Soc. Civil Engrg.*, 1974, 1037-1053.
- [18] PERRIN G, LEBLOND J B. Rudnicki and Rice's analysis of strain localization revisited [J]. *Journal of Applied Mechanics*, 1993, 60: 842-846.
- [19] FOSSUM F A, FREDRICH J T. Cap plasticity models and compactive and dilatant pre-failure deformation [J]. *Journal of Applied Mechanics*, 2000, 60: 612-619.
- [20] RUDNICKI J W. Localized failure in brittle rock. In: Shao, J. F., Burlion, N. (Eds.) *Thermo-Hydromechanical and Chemical Coupling in Geomaterials and Applications* [C] // *Proceedings of the 3rd International Symposium GeoProc.* 2008, Wiley: 25-40.
- [21] ISSEN K A. The influence of constitutive models on localization conditions for porous rock [J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2002, 69: 1891-1906.
- [22] LADE P V, WANG Q. Analysis of shear banding in true triaxial tests on sand [J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 2001, 127 (8): 762-768.
- [23] OLSSON W A. Theoretical and experimental investigation of compaction bands [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1999, 104: 7219-7228.
- [24] OLSSON W A, HOLCOMB D J. Compaction localization in porous rock [J]. *Geophysical Research Letters*, 2000, 27 (21): 3537-3540.

(编辑 王秀玲)

(上接第 62 页)

- [8] SU D. Centrifuge investigation on responses of sand deposit and sand-pile system under multi-directional earthquake loading [D]. Hong Kong: The Hong Kong University of Science and Technology, 2005.
- [9] KNAPPET J A, MADABHUSHI S P G. Modelling of liquefaction-induced instability in pile groups [J]. *Geotechnical Special Publication*, 2006, 145: 255-267.
- [10] WANG H B, LI D Y. Experimental study of dynamic damage of an arch dam [J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2007, 36(3): 347-366.
- [11] 范书立. 混凝土重力坝的动力模型破坏试验及可靠性研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2007.
- [12] 朱长安, 高波, 索然绪. 强震区隧道洞口段振动台模型试验研究 [J]. *现代隧道技术*, 2008, 45(1): 48-52.
HU CHAN-AN, GAO BO, SUO RAN-XU. Shaking table test for portal section of a tunnel in high-intensity seismic region [J]. *Modern Tunnel Technology*, 2008, 45 (1): 48-52.
- [13] 冯士伦, 王建华. 海洋平台桩基的振动台模型试验研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2006, 25(S1): 3229-3234.
- FENG SHI-LUN, WANG JIAN-HUA. Shake table model test on pile foundation of offshore platforms [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, 25(S1): 3229-3234.
- [14] JTJ 004-89 公路工程抗震设计规范 [S]. 北京: 人民交通出版社, 1990.
- [15] 杨俊杰. 相似理论与结构模型试验 [M]. 武汉: 武汉理工大学出版社, 2005.
- [16] 李培振. 结构—地基动力相互作用体系的振动台试验及计算模拟分析 [D]. 上海: 同济大学土木工程防灾国家重点实验室, 2002.
- [17] PRASAD S K, TOWHATA I. Shaking table tests in earthquake geotechnical engineering [J]. *Current Science*, 2004, 87(10): 1398-1404
- [18] GB 50011-2001 建筑抗震设计规范 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001

(编辑 胡英奎)