

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*

王学滨¹ 姚再兴^{1,2} 马 剑¹ 潘一山¹

(¹辽宁工程技术大学力学与工程科学系 阜新 123000) (²中国科学院力学研究所 北京 100080)

摘要 在流动剪切应力为残余剪切强度时,对剪切带内部的局部孔隙比和平均孔隙比进行了理论分析。对于应变软化阶段剪胀的岩土材料,基于梯度塑性理论验证了在剪切带内部存在最大孔隙比的客观事实,最大孔隙比具有两层含义,即局部(和坐标有关)最大孔隙比和平均最大孔隙比,分别解释了相关的实验现象。对影响剪切带内部平均最大孔隙度的因素进行了分析;给出了剪切软化模量、残余剪切强度及扩容角对剪切带内部最大孔隙度的影响规律。在软化过程中,剪切带中部最大孔隙度逐渐增加,直至残余强度剪切带中部最大孔隙度达到最大值。研究结果为流固耦合多孔介质岩土材料的稳定性研究奠定了初步的理论基础。

关键词 岩土力学, 梯度塑性理论, 局部化, 剪切带, 多孔介质, 局部最大孔隙比, 平均最大孔隙比

分类号 TU 451

文献标识码 A

文章编号 1000-6915(2004)15-2519-04

ANALYSIS OF VOID CHARACTERISTICS IN SHEAR BAND OF POROUS MEDIA (2) : MAXIMUM VOID RATIO

Wang Xuebin¹, Yao Zaixing^{1,2}, Ma Jian¹, Pan Yishan¹

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

(²Institute of Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080 China)

Abstract Local void ratio and average void ratio in shear band are investigated as residual shear strength is reached. For quasi-brittle materials that dilate, some experimental results show that maximum void ratio occurs in critical state of the shear band. Further discussion is made based on gradient-dependent plasticity with consideration of the effect of microstructures. Local maximum void ratio is different from average maximum void ratio. Local means are dependent on coordinates, while the average stands for the whole shear band. Influences of dilation angle, initial void ratio with shear localization initiated, residual shear strength, shear elastic modulus and shear softening modulus on the average maximum porosity and on the maximum porosity are analyzed. In the process of residual deformation, maximum void ratio is reached and remains constant. The presented conclusion lays a foundation for problem of instability involved in coupling of fluid and porous media.

Key words rock and soil mechanics, gradient-dependent plasticity, localization, shear band, porous media, local maximum void ratio, average maximum void ratio

1 引言

文[1~3]的实验结果都表明,在剪切带内部,

存在最大孔隙比。换言之,在软化阶段,剪切带内部的孔隙比等孔隙特征参数不是无限制的增加。

文[4]指出,最高渗透率大多数发生在软化段。

文[5]指出,岩石的渗透率多出现峰值,且峰值多出

2002年12月3日收到初稿,2003年1月24日收到修改稿。

* 国家自然科学基金(50309004)项目。

作者 王学滨 简介:男,30岁,硕士,1998年毕业于辽宁工程技术大学,主要从事岩石力学理论与岩土工程数值计算方面的研究工作。E-mail: wxbbb@263.net。

现在应变软化阶段，在岩石破坏后的塑性流动阶段，渗透率基本趋于稳定。文[6]指出，岩样破坏至应变软化阶段，渗透性急剧增强并达到渗透峰值，随变形扩展逐步趋于稳定。文[7]指出，裂隙流量不会随剪切变形的增加无限增大，而是趋向某个稳定值。

若在应变软化阶段，岩石是剪胀的，则当达到最大孔隙比时，孔隙的尺寸不再改变。因此，岩石的渗透系数也将保持恒定，为最大值。反之，若渗透系数保持恒定，那么一定达到了最大孔隙比。故文[4~7]也间接证明了最大孔隙比是存在的。

本文在上文(“多孔隙介质岩土材料剪切带孔隙特征研究(1)——孔隙度局部化”一文)的基础上，得到了最大孔隙比的表达式，探讨了一些因素对最大孔隙比的影响，以深入了解局部化启动后孔隙特征参数的变化规律。

2 理论分析

2.1 剪切带内部最大孔隙比

假设在某一围压时，岩土材料的残余剪切强度为 t_r ，见上文中图 2，则此时剪切带内部局部塑性剪应变 $g_r^p(y)$ 为

$$g_r^p(y) = \frac{t_c - t_r}{c} \left(1 + \cos \frac{y}{l} \right) \quad (1)$$

当 $y=0$ 时， $g_r^p(y)$ 取得最大值，即

$$g_{rm}^p = \frac{2(t_c - t_r)}{c} \quad (2)$$

由上文中式(21)可得 $e_v^p(y)$ 的最大值 e_{vm}^p 为

$$e_{vm}^p = -\sin y g_{rm}^p \quad (3)$$

将上式中 e_{vm}^p 代入上文中式(14)，可以得到剪切带内部最大孔隙度为

$$n'_m = \frac{e - e_{vm}^p(1+e)}{1+e - e_{vm}^p(1+e)} = \frac{e_m}{1+e_m} \quad (4)$$

式中： e_m 为剪切带内部最大孔隙比，且

$$e_m = e + 2 \sin y (1+e) \frac{t_c - t_r}{c} = e + \Delta e_m \quad (5)$$

式中： Δe_m 为剪切局部化引起的孔隙比增量的最大值(剪胀引起的剪切带内部最大孔隙比增量)。

2.2 剪切带内部平均最大孔隙比增量

设剪胀引起的剪切带内部平均最大孔隙比增量为 $\Delta \bar{e}_m$ 。平均最大孔隙比增量是指最大孔隙比增量的平均值，可以表示为

$$\Delta \bar{e}_m = \frac{2}{w} \int_0^{w/2} \Delta e_r(y) dy \quad (6)$$

式中： $\Delta e_r(y)$ 由上文中式(7)，(19)及(21)确定，其中，

$t = t_r$ ； $\Delta e_r(y)$ 及 $\Delta \bar{e}_m$ 可以表示为

$$\Delta e_r(y) = \sin y (1+e) \frac{t_c - t_r}{c} \left(1 + \cos \frac{y}{l} \right) \quad (7)$$

$$\Delta \bar{e}_m = \sin y (1+e) \frac{t_c - t_r}{c} \quad (8)$$

则由式(5)，(7)及(8)可得

$$\Delta e_r(y) = \Delta \bar{e}_m \left(1 + \cos \frac{y}{l} \right) \quad (9)$$

$$\Delta e_m = 2 \Delta \bar{e}_m \quad (10)$$

2.3 剪切带内部平均最大孔隙比

设剪切带内部平均最大孔隙比为 \bar{e}_m ，它包括两部分：一部分为初始孔隙比 e ；另一部分为剪胀引起的剪切带内部平均最大孔隙比增量 $\Delta \bar{e}_m$ 。因此，有

$$\bar{e}_m = e + \Delta \bar{e}_m \quad (11)$$

剪切带内部平均最大孔隙度 \bar{n}'_m 可以表示为

$$\bar{n}'_m = \frac{\bar{e}_m}{1 + \bar{e}_m} \quad (12)$$

2.4 \bar{n}'_m 的影响因素分析

容易看出，凡引起剪切带内部平均最大孔隙比 \bar{e}_m 增加的因素，就会引起剪切带内部平均最大孔隙度 \bar{n}'_m 的增加。即随着扩容角 y 的增加， \bar{n}'_m 增加；随着初始孔隙比(局部化启动时) e 的增加， \bar{n}'_m 增加；随着残余剪切强度 t_r 的降低， \bar{n}'_m 增加；剪切弹性模量 G 及剪切软化模量 I 降低， \bar{n}'_m 增加。

3 算例

在本节中仅给出剪切软化模量 I 、残余剪切强度 t_r 及扩容角 y 对剪切带内部最大孔隙度 n'_m 的定量影响，限于篇幅，对其他孔隙特征参数的影响不再赘述。

取 $G = 20 \text{ GPa}$ ， $l = 0.006 \text{ m}$ ， $e = 0.05$ ， $y = 0.25\pi$ ， $t_r = 2 \text{ MPa}$ ， $t_c = 20 \text{ MPa}$ 。不同剪切软化模量时的最大孔隙度 n'_m 的计算结果见图 1。可见，剪切软化模量越大，剪切带内部最大孔隙度越小。这是由于剪切软化模量越大，则岩土材料脆性越强，塑性变形越小。因此，剪切带内部最大孔深度越小。

取 $G = 20 \text{ GPa}$ ， $l = 0.006 \text{ m}$ ， $e = 0.05$ ， $y = 0.25\pi$ ， $I = 10 \text{ GPa}$ ， $t_c = 20 \text{ MPa}$ 。不同残余剪切强度时的最大孔隙度 n'_m 的计算结果见图 2。可见，残余剪切强度越大，剪切带内部最大孔隙度越小。这是由于残余剪切强度越大，则抗剪切强度 t_c 与残余剪切强度之差越小，即应变软化越不严重的缘故。

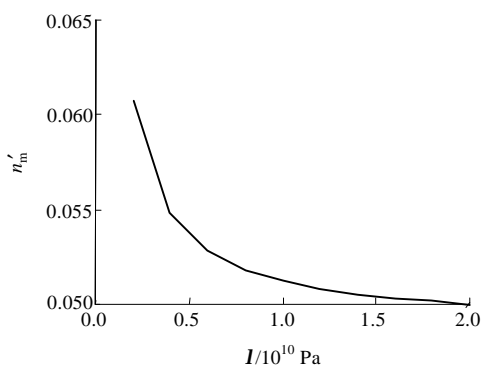


图 1 剪切软化模量与最大孔隙度的关系

Fig.1 Relation between shear softening modulus and maximum porosity in shear band

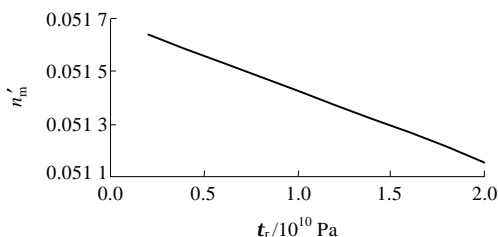


图 2 残余剪切强度与最大孔隙度的关系

Fig.2 Relation between residual shear strength and maximum porosity in shear band

取 $G = 20 \text{ GPa}$, $l = 0.006 \text{ m}$, $e = 0.05$, $y = 0.25\pi$, $I = 10 \text{ GPa}$, $t_r = 2 \text{ MPa}$ 。不同剪胀角时的最大孔隙度 n'_m 的计算结果见图 3。可见,剪胀角越大,剪切带内部最大孔隙度越大。这是由于剪胀角越大,则在相同塑性剪应变条件下的塑性体积应变越大的缘故。

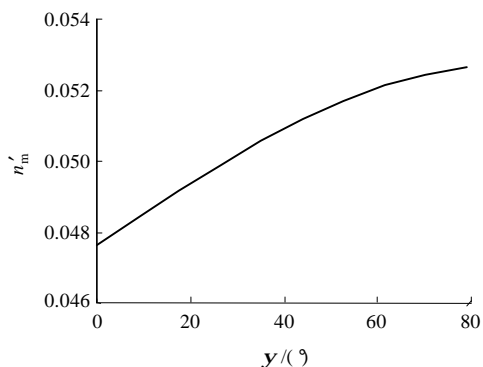


图 3 剪胀角与最大孔隙度的关系

Fig.3 Relation between shear dilation angle modulus and maximum porosity in shear band

4 讨论

4.1 剪胀与剪缩

若扩容角 $y > 0$, 则意味着剪胀;若 $y < 0$, 则意味着剪缩。通常,松砂剪缩而密砂剪胀^[8],软岩剪缩而硬岩剪胀。上文及本文的分析都是针对剪胀而言。换言之,上文及本文的分析适用于密砂及硬岩,它们在峰值强度后,将呈现明显的应变局部化特征(在试样中出现剪切带),而不是均匀的变形。对于剪胀材料而言,在应变软化过程中孔隙比及孔隙度等参数都将持续增加。因此,当到达残余阶段时,在理论上,渗透率应达到应变软化阶段的最大值。

4.2 几个新概念

为了描述局部化启动后剪切带内部的具有局部化特征的孔隙参数,本文提出了几个新概念,如:剪胀引起的剪切带内部平均最大孔隙比增量、剪胀引起的剪切带内部最大孔隙比增量、剪切带内部平均最大孔隙比及剪切带内部平均最大孔隙度等。并建立了它们之间的联系。

4.3 最大孔隙比的两层含义

在某一流动剪应力水平下,剪切带内部存在局部(和坐标有关)最大孔隙比及局部最大孔隙度。而且,当流动剪应力达到残余剪切强度时,局部最大孔隙比及局部最大孔隙度均达到临界值,该值为最大值。此时,剪切带内部平均(和坐标无关)最大孔隙比及最大孔隙度均达到临界值,该值也为最大值。文[9]中的“局部孔隙比”是指本文中的平均孔隙比。文[10]表明,在残余强度阶段,“孔隙比”稳定在最大值不再增加,其“孔隙比”也相当于本文中的平均孔隙比。另外,文[11]提到的“临界孔隙比”也是指本文中的平均孔隙比。

4.4 平均孔隙比与平均塑性剪应变的关系

上文给出了剪切带内部塑性剪应变 $g^p(y)$ 的表达式,令其平均值为 \bar{g}^p ,则有

$$\bar{g}^p = \frac{2}{w} \int_0^{w/2} g^p(y) dy = \frac{t_c - t}{c} \tag{13}$$

类似式(8),可得

$$\Delta \bar{e} = \sin y (1 + e) \frac{t_c - t}{c} \tag{14}$$

式中: $\Delta \bar{e}$ 为剪胀引起的剪切带内部平均孔隙比增量。利用式(13)及(14),可得

$$\frac{\Delta \bar{e}}{\bar{g}^p} = \sin y (1 + e) \tag{15}$$

类似式(11),容易得到

$$\bar{e} = e + \Delta \bar{e} \tag{16}$$

式中： \bar{e} 为剪切带内部平均孔隙比，利用式(15)及(16)，可得

$$\bar{e} = e + \sin\psi(1+e)\bar{g}^p \tag{17}$$

容易看出：在应变软化阶段，剪切带内部平均孔隙比与平均塑性剪切应变的关系为线性；在残余强度阶段，剪切带内部平均孔隙比保持最大值，不再改变，见图4。

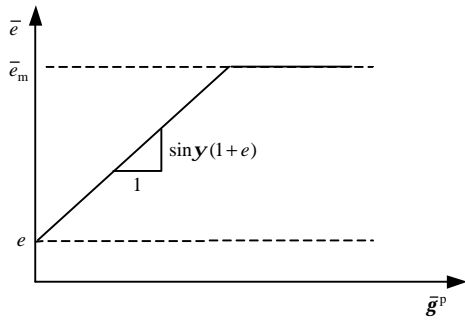


图4 平均孔隙比与平均塑性剪切应变的关系

Fig.4 Relation between average void ratio and average plastic shear strain

4.5 实验结果验证

一方面，上文及本文的若干理论分析真实地反映了若干实验结果^[1-3]：剪切带内部孔隙比等孔隙特征参数分布极不均匀；带内孔隙比是带外孔隙比(初始孔隙比 e)的若干倍；在剪切带内部，孔隙比等孔隙特征参数具有局部化特征。

另一方面，上文及本文的若干理论分析还反映了在残余强度阶段，平均孔隙比保持最大值不再改变的实验现象^[9, 10]。

不仅如此，本文还对剪切带的孔隙特征参数进行了较全面的研究及预测。所获得的研究结果是合理的，并进行了适当的解释。

5 结 论

(1) 对于应变软化阶段剪胀的岩土材料，从理论上验证了在剪切带内部存在最大孔隙比的客观事实，提出了相应的理论表达式，最大孔隙比具有两层含义，即：局部最大孔隙比和平均最大孔隙比，

分别解释了相关的实验现象。

(2) 对影响剪切带内部平均最大孔隙度的因素进行了分析；给出了剪切软化模量，残余剪切强度及扩容角对剪切带内部最大孔隙度的影响规律。

(3) 在应变软化阶段，剪切带内部平均孔隙比与平均塑性剪切应变的关系为线性；在残余强度阶段，剪切带内部平均孔隙比保持最大值，不再改变。

参 考 文 献

- 1 Wong R C K. Shear deformation of locked sand in triaxial compression[J]. Geotechnical Testing Journal, 2000, 23(2): 158 ~ 170
- 2 Oda M, Kazama H. Microstructure of shear bands and its relation to the mechanisms of dilatancy and failure of dense granular soils[J]. Géotechnique, 1998, 48(4): 465 ~ 481
- 3 Desues J, Chambon M, Mokni M. Void ratio evolution inside shear bands in triaxial sand specimens studied by computed tomography[J]. Géotechnique, 1996, 46(3): 411 ~ 418
- 4 李世平, 李玉寿, 吴振业. 岩石全应力应变过程对应的渗透率-应变方程[J]. 岩土工程学报, 1995, 17(2): 13 ~ 19
- 5 姜振泉, 季梁军, 左如松等. 岩石在伺服条件下的渗透性与应变、应力的关联性特征[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(10): 1442 ~ 1446
- 6 朱珍德, 张爱军, 徐卫亚. 脆性岩石全应力-应变过程渗流特性试验研究[J]. 岩土力学, 2002, 23(5): 555 ~ 558, 563
- 7 刘才华, 陈从新, 付少兰. 充填砂裂隙在剪切位移作用下渗流规律的实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(10): 1457 ~ 1461
- 8 沈珠江. 理论土力学[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2000
- 9 Desrues J. Localization patterns in ductile and brittle geomaterials[A]. In: De Borst R, Van Der Giessen E ed. Material Instabilities in Solids[C]. [s. l.]: Wiley-Interscience-Europe, 1998, 137 ~ 158
- 10 Lade P V. Experimental observations of stability, instability, and shear planes in granular materials[J]. Ingenieur-Archiv, 1989, 59: 114 ~ 123
- 11 Morrow C, Byerlee J D. Experimental studies of compaction and dilatancy during frictional sliding on faults containing gouge[J]. Journal of Structural Geology, 1989, 11(7): 815 ~ 825