

文章编号: 1000-0887(2005) 11-1337-08

# 饱和多孔介质中骨架的应变局部化萌生条件<sup>\*</sup>

赵纪生<sup>1,2</sup>, 陶夏新<sup>1,2</sup>, 师黎静<sup>1</sup>, 欧进萍<sup>2</sup>

(1. 中国地震局 工程力学研究所, 哈尔滨 150080  
2. 哈尔滨工业大学 土木工程学院, 哈尔滨 150006)

(林建忠推荐)

**摘要:** 应用饱和多孔介质控制方程和 Liapunov 稳定理论, 导出了固相应力和有效应力描述的多孔介质骨架应变局部化的萌生条件。不同应力形式表达的多孔介质基体的控制方程, 相应的应变局部化萌生条件的表达形式也不尽相同, 其原因源于骨架本构中固液两相之间相互作用的不同描述。应用得出的 Terzaghi 有效应力描述的应变局部化萌生条件, 可以理论解释多孔介质中固、液两相不同相对运动出现的破坏方式, 如管涌、滑坡和泥石流。应用简单算例说明了应变局部化条件的具体实施方法。

**关键词:** 多孔介质; 固相应力; 有效应力; 本构模型; 应变局部化条件  
**中图分类号:** O347.2; TU432      **文献标识码:** A

## 引 言

应变局部化是自然界饱和多孔介质材料常见的破坏形式之一, 这种破坏形式表现为地质条件发生变化的山区, 在雨水充分浸润时出现的山体滑坡和泥石流; 河流两岸堤坝、公路铁路堤岸在河水上涨时出现的管涌和溃坝; 强烈地震时引起地表破裂等。这类破坏的初始破坏现象表现为土骨架的应变会在一很窄的区域内快速集中发展, 形成应变局部化带, 带内的材料处于局部失稳状态, 强度和刚度严重退化。随着外部作用的持续或加剧, 应变局部化带沿滑移面继续扩展, 形成宏观破坏。

渗流是饱和多孔介质内一个普遍现象<sup>[1]</sup>。考虑渗流下的多孔介质材料应变局部化萌生条件适用范围将有大的扩展, 有可能理论解释固、液两相之间的相对运动的方式、程度对多孔介质材料破坏形式的影响, 客观评定、预测自然界饱和多孔介质材料破坏。

本文将在考虑渗流情况下的饱和多孔介质材料应变局部化萌生条件展开研究, 应用 Liapunov<sup>[2]</sup> 稳定理论和饱和多孔介质的控制方程<sup>[3~5]</sup> 讨论固相应力、有效应力描述的饱和多孔介质材料应变局部化的萌生条件。

\* 收稿日期: 2003\_10\_30; 修订日期: 2005\_10\_19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50478034); 国家社会公益研究专项资助项目(2002DIB30076)

作者简介: 赵纪生(1963—), 男, 河南人, 副研究员, 博士(联系人, Tel: + 86\_451\_86652825; Fax: + 86\_451\_86664755; E\_mail: jisheng\_zhao@iem.net.cn)。

## 1 多孔介质材料的规则化<sup>[3]</sup>

设  $P$  是多孔介质内一个质点, 考虑  $P$  点邻域内一个比单个空隙或单个固体颗粒大的体积  $\Delta U$ ,  $\Delta U$  内的孔隙体积为  $\Delta U_v$ , 那么  $P$  点的孔隙比定义为

$$f(P) = \lim_{\Delta U_i \rightarrow \Delta U_b} \frac{\Delta U_{v_i}}{\Delta U_i - \Delta U_{v_i}} \quad (1)$$

式中,  $\Delta U_b$  称之为多孔介质的特征单元。

实际上, 多孔介质内的质点是一个小体积内许多分子的集合, 质点的体积比颗粒的平均自由程大得多, 但和所考虑的范围又足够小。假定  $f(P)$  在多孔介质内是光滑变化的, 则意味着  $f$  是点  $P$  位置的连续函数, 但它具有平均或统计性质。应用这个定义, 则可把特征单元内流体流动和骨架受力变形的平均性质与这些性质的质点联系起来, 构成多孔介质材料本构反应和作用的确定性。

## 2 多孔介质的控制平衡方程<sup>[3~5]</sup>

本文仅考虑多孔介质在温度恒定、孔隙液为纯水、没有溶解、传质现象情况下的小应变问题。孔隙率为  $f$ , 固相密度为  $\rho_s$ , 液相密度为  $\rho_l$ 。

饱和两相多孔介质的质量连续方程

$$(1-f) \left[ \frac{1}{\rho_s} \frac{d\rho_s}{dt} + v_{n,n}^s \right] + f \left[ \frac{1}{\rho_l} \frac{d\rho_l}{dt} + v_{n,n}^l \right] = 0, \quad (2)$$

式中,  $v_i^s, v_i^l$  分别为固相、液相的位移速度。

动力平衡方程

固相(土骨架部分)

$$\sigma_{ij,n}^s - b(v_j^s - v_j^l) - b(v_j^s - v_j^l) = (1-f) \rho_s \dot{v}_j^s + (1-f) (\rho_s v_j^s - f \rho_s v_j^s), \quad (3)$$

式中,  $\sigma_{ij}^s = D_{ijkl}^{ep} \epsilon_{kl}^s$ ;  $\epsilon_{kl}^s = (v_{k,l}^s + v_{l,k}^s)/2$ ,  $\sigma_{ij}^s$  为固相应力率;  $\epsilon_{kl}^s$  为固相应变率;  $D_{ijkl}^{ep}$  为固相应力描述的固相弹塑性切线模量张量;  $b$  为阻力系数;  $\dot{b}$  为阻力系数的时间变化率。

液相(孔隙液部分)

$$\sigma_{ij,n}^l - b(v_j^l - v_j^s) - b(v_j^l - v_j^s) = f \rho_l \dot{v}_j^l + f (\rho_l v_j^l + f \rho_l v_j^l), \quad (4)$$

式中,  $\sigma_{ij}^l = -\delta_{ij} p^l + D_{ijkl}^l \epsilon_{kl}^l$ ;  $\epsilon_{kl}^l = (v_{k,l}^l + v_{l,k}^l)/2$ ,  $\sigma_{ij}^l$  为液相应力率;  $\epsilon_{kl}^l$  为液相应变率;  $D_{ijkl}^l$  为粘性系数张量。

物态方程

$$-p^l = K_l \left[ \frac{\rho_l}{\rho_{l0}} - 1 \right], \quad -\frac{\sigma_{mm}^s}{3} = K_s \left[ \frac{\rho_s}{\rho_{s0}} - 1 \right], \quad (5)$$

式中,  $K_s, K_l$  分别为固相和液相的体积模量。

流体运动阻力模型

$$b = \frac{\mu \rho_l f^2}{K}, \quad (6)$$

式中,  $K$  为液相在骨架内的渗透系数,  $\mu$  为液相的粘性系数。

本文应用点接触多孔介质模型<sup>[6]</sup>, 讨论固相应力和有效应力描述的本构关系下的应变局部化萌生条件。总应力、Terzaghi 有效应力、液相应力与固相应力之间的关系为

$$\sigma_{ij}^s = \sigma_{ij} - f \sigma_{ij}^l, \quad \sigma_{ij}^s = \sigma_{ij} - (1-f) \sigma_{ij}^l, \quad (7)$$

式中,  $\sigma_{ij}$  为总应力,  $\sigma_{ij}^s$  为固体相应力,  $\sigma_{ij}^l$  为 Terzaghi 有效应力,  $\sigma_{ij}^l$  为液相应力。

### 3 固相应力描述的多孔介质应变局部化的萌生条件

应用 Liapunov 稳定理论对非保守动力系统的、固相应力描述下的饱和多孔介质材料进行稳定性探讨。固相应力表示的固相部分动力方程, 见式(3)。在固相处于某一弹塑性平衡状态下的一个微小增量步内应用 Boit 方程中隐藏的固相密度、液相密度和孔隙率不变的假定<sup>[5]</sup>, 式(3)简化为,

$$\sigma_{ij, n}^s - b(v_j^s - v_j^l) = (1-f)\rho_s \dot{v}_j^s \quad (8)$$

假定多孔介质中的流体流动符合达西定律, 液相部分的动力方程为

$$-p_{,j}^l - b(v_j^l - v_j^s) = f\rho_l \dot{v}_j^l \quad (9)$$

应用固、液相的物态方程, 质量连续方程为:

$$-p_{,j}^l = \frac{1-f}{f} \frac{\rho_l}{\rho_{s0}} \frac{\rho_{s0}}{\rho_s} \frac{K_1}{3K_s} \sigma_{nn}^s - \frac{1-f}{f} \frac{\rho_l}{\rho_{s0}} K_1 v_{n,n}^s - \frac{\rho_l}{\rho_{s0}} K_1 v_{n,n}^l \quad (10)$$

分析过程中, 假定固相密度、液相密度变化不大, 即  $\rho_l/\rho_{s0} \cong 1$ ,  $\rho_s/\rho_{s0} \cong 1$ 。上式进一步简化为

$$-p_{,j}^l = \frac{1-f}{f} \frac{K_1}{3K_s} \sigma_{nn}^s - \frac{1-f}{f} K_1 v_{n,n}^s - K_1 v_{n,n}^l \quad (11)$$

设  $D_{ijkl}^{ep}$  具有 Voigt 对称性, 并对式(8)、式(9)进行整理, 饱和多孔介质的控制方程为

$$(D_{ijkl}^{ep} v_{k,l}^s)_{,n} - \frac{\gamma^2 \rho_l}{K} (v_j^s - v_j^l) = (1-f)\rho_s \dot{v}_j^s \quad (12a)$$

$$\left[ \frac{1-f}{f} \frac{K_1}{3K_s} \sigma_{ii}^s - \frac{1-f}{f} K_1 v_{k,k}^s - K_1 v_{k,k}^l \right]_{,j} - \frac{\gamma^2 \rho_l}{K} (v_j^l - v_j^s) = f\rho_l \dot{v}_j^l \quad (12b)$$

引入变量,

$${}^1 w_j^s = v_j^s, \quad {}^2 w_j^s = v_j^s; \quad {}^1 w_j^l = v_j^l, \quad {}^2 w_j^l = v_j^l \quad (13)$$

把式(12a)转化为一阶微分方程,

$${}^1 u_{,j}^s = {}^2 w_{,j}^s \quad (14a)$$

$$D_{ijkl}^{ep} {}^1 w_{k,ln}^s - \frac{\gamma^2 \rho_l}{K} ({}^2 w_j^s - {}^2 w_j^l) = (1-f)\rho_s \dot{u}_{,j}^s \quad (14b)$$

定义微分算子,

$$D_{jkl}^{ep} v_k^s = D_{ijkl}^{ep} \frac{\partial^2}{\partial x_n \partial x_l} v_k^s \quad (15)$$

$$L_1({}^1 w_j^s, {}^1 w_j^l) =$$

$$\left[ \left[ D_{jkl}^{ep} \sigma_{km}^s {}^1 w_m^s - \frac{\gamma^2 \rho_l}{K} {}^2 w_j^s - (1-f)\rho_s \dot{u}_{,j}^s \right] + \frac{\gamma^2 \rho_l}{K} {}^2 w_j^l \right] = 0 \quad (16)$$

把式(12b)转化为一阶微分方程,

$${}^1 u_{,j}^l = {}^2 w_{,j}^l \quad (17a)$$

$$\left[ \frac{1-f}{f} \frac{K_1}{3K_s} D_{ijkl}^{ep} {}^1 w_{k,ln}^s \delta_{kl} - \frac{1-f}{f} K_1 {}^1 w_{k,kj}^s - K_1 {}^1 w_{k,kj}^l \right] - \frac{\gamma^2 \rho_l}{K} ({}^2 w_j^l - {}^2 w_j^s) = f\rho_l \dot{u}_{,j}^l \quad (17b)$$

定义微分算子,

$$K_{jk}v_k^s = -K_1 I_{ijkl} \delta_{kl} \frac{\partial^2}{\partial x_n \partial x_l} v_k^s; D_{jk}^{\text{ep}} v_k^s = D_{ijkl}^{\text{ep}} \delta_{kl} \frac{\partial^2}{\partial x_n \partial x_l} v_k^s, \quad (18)$$

$$L_2({}^1w_j^s, {}^1w_j^l) = \left[ \frac{(1-f)K_1}{3fK_s} D_{jk}^{\text{ep}} \delta_{km} {}^1w_m^s + \frac{1-f}{f} K_{jm} {}^1w_m^s + \frac{\mathcal{H}^2 \rho_2}{K} {}^2w_j^s + K_{jm} {}^1w_m^l - \frac{\mathcal{H}^2 \rho_2}{K} {}^2w_j^l - f \rho_1 {}^2w_j^l \right] = 0, \quad (19)$$

由于固相和液相是一整体, 定义  $L = \begin{Bmatrix} L_1 \\ L_2 \end{Bmatrix}$ . 合并式(16)、式(19)后的整体动力方程为

$$L[{}^1w_j^s, {}^1w_j^l] = 0, \quad (20)$$

设方程(20)的解为

$$[{}^1w_j^s, {}^1w_j^l] \exp(\lambda t), \quad (21)$$

式(21)代入式(13), 有

$${}^2w_j^s = \lambda^1 w_j^s; {}^2w_j^l = \lambda^2 w_j^l; {}^2w_j^s = \lambda^1 w_j^l; {}^2w_j^l = \lambda^2 w_j^s, \quad (22)$$

式(16)、式(19)改写为矩阵形式

$$\begin{bmatrix} \tilde{D}_{11} & \tilde{D}_{12} \\ \tilde{D}_{21} & \tilde{D}_{22} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} w_m^s \\ w_m^l \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \end{Bmatrix}, \quad (23)$$

其中:

$$\begin{aligned} [\tilde{D}_{11}]_{j,m} &= D_{jk}^{\text{ep}} \delta_{km} - \frac{\mathcal{H}^2 \rho_2}{K} \lambda \delta_{jm} - (1-f) \rho_s \lambda^2 \delta_{jm}; \\ [\tilde{D}_{12}]_{j,(m+3)} &= \frac{\mathcal{H}^2 \rho_2}{K} \lambda \delta_{jm}; \\ [\tilde{D}_{21}]_{(j+3),m} &= \frac{1-f}{f} \frac{K_1}{3K_s} D_{jk}^{\text{ep}} \delta_{km} + \frac{\mathcal{H}^2 \rho_2}{K} \lambda \delta_{jm} + \frac{1-f}{f} K_{jm}; \\ [\tilde{D}_{22}]_{(j+3),(m+3)} &= K_{jk} \delta_{km} - \frac{\mathcal{H}^2 \rho_2}{K} \lambda \delta_{jm} - f \rho_1 \lambda^2 \delta_{jm}. \end{aligned}$$

当波表述为  $v_j^s = q_j^s \exp(i(n_m x_m - ct))$ ,  $v_j^l = q_j^l \exp(i(n_m x_m - ct))$  时, 且当仅讨论多孔介质的静力稳定性问题(应变局部化萌生)时, 那么式(23)简化为,

$$\begin{bmatrix} D_{jkmn}^{\text{ep}} n_m n_k & 0 \\ \frac{1-f}{f} \left[ \frac{K_1}{3K_s} D_{jkmn}^{\text{ep}} - K_1 \right] \delta_{km} n_m n_k & - I_{jkmn} K_1 \delta_{km} n_m n_k \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} q_n^s \\ q_n^l \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \end{Bmatrix}, \quad (24)$$

式中,  $I_{jkmn}$  是一四阶等同张量。上式表明, 考虑固相部分时, 固相部分与液相部分不耦合。要得到(24)式  $\begin{Bmatrix} q_k^s \end{Bmatrix}$  的非零解, 有则仅有

$$\det[D_{jkmn}^{\text{ep}} n_m n_k] = 0, \quad (25)$$

(25) 式为固相应力描述的饱和多孔介质应变局部化萌生条件。

实际上, 基于固相应力的弹塑性本构关系的研究成果很少, 对广泛采用 Terzaghi 的有效应力展开类似的讨论对工程应用是有意义的。

#### 4 有效应力描述的多孔介质应变局部化的萌生条件

把固相应力替化为有效应力的表达式(7), 重复上述固相应力描述的应变局部化条件推导过程。需要指出, 本节对有效应力描述的多孔介质动力方程的描述, 用  $C_{jkl}^{\text{ep}}$  表示有效应力描

述的切线模量张量• 控制方程为

$$\left( C_{njkl}^{ep} v_{k,l}^s \right)_{,n} + \left[ - \frac{(1-f)^2 K_1}{f 3K_s} \delta_{im}^s + \frac{(1-f)^2}{f} K_1 v_{n,n}^s + (1-f) K_1 v_{n,n}^1 \right]_{,j} - \frac{\mathcal{Y}^2 \rho_1}{K} (v_j^s - v_j^1) = (1-f) \rho_s v_j^s, \tag{26}$$

$$\left[ \frac{1-f}{f} \frac{K_1}{3K_s} \delta_{ij}^s - \frac{1-f}{f} K_1 v_{n,n}^s - K_1 v_{n,n}^1 \right]_{,j} - \frac{\mathcal{Y}^2 \rho_1}{K} (v_j^1 - v_j^s) = f \rho_1 v_j^1, \tag{27}$$

最后的结果为

$$\begin{bmatrix} \tilde{D}_{11} & \tilde{D}_{12} \\ \tilde{D}_{21} & \tilde{D}_{22} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} v_m^s \\ v_m^1 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \end{Bmatrix}, \tag{28}$$

其中:

$$[\tilde{D}_{11}]_{j,m} = C_{jk}^{ep} \delta_{km} - \frac{(1-f)^2}{f} \left[ K_{jm} + \frac{K_1}{3K_s} C_{jk}^{ep} \delta_{km} \right] - \frac{\mathcal{Y}^2 \rho_1}{K} \lambda \delta_m - (1-f) \rho_s \lambda^2 \delta_m;$$

$$[\tilde{D}_{12}]_{j,(m+3)} = - (1-f) K_{jk} \delta_{km} + \frac{\mathcal{Y}^2 \rho_1}{K} \lambda \delta_m;$$

$$[\tilde{D}_{21}]_{(j+3),m} = \frac{\mathcal{Y}^2 \rho_1}{K} \lambda \delta_m + \frac{1-f}{f} \left[ K_{jk} \delta_{km} + \frac{K_1}{3K_s} C_{jk}^{ep} \delta_{km} \right];$$

$$[\tilde{D}_{22}]_{(j+3),(m+3)} = K_{jk} \delta_{nk} - \frac{\mathcal{Y}^2 \rho_1}{K} \lambda \delta_m - f \rho_1 \lambda^2 \delta_m.$$

与上述固相应力描述的情况相同, 当仅讨论饱和多孔介质的应变局部化萌生时, 所对应的是材料静力稳定性问题, 那么式(28)简化为,

$$\begin{bmatrix} C_{jkmn}^{ep} n_m n_k + \frac{(1-f)^2}{f} \left[ K I_{jkmn} - \frac{K_1}{3K_s} C_{jkmn}^{ep} \right] \delta_{km} n_m n_k & (1-f) K_1 I_{jkmn} \delta_{km} n_m n_k \\ \frac{1-f}{f} \left[ \frac{K_1}{3K_s} C_{jkmn}^{ep} - K_1 I_{jkmn} \right] \delta_{km} n_m n_k & - K_1 I_{jkmn} \delta_{km} n_m n_k \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} q_n^s \\ q_n^1 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \end{Bmatrix}. \tag{29}$$

饱和多孔介质的应变局部化破坏的主体是土骨架部分• 应用固液两相位移之间的关系  $q_j^1 = N_{jk} q_k^s$ ,  $N_{jk}$  为固、液两相位移速度的夹角转置• 式(29)中的固相部分应变局部化萌生条件为

$$\left[ \left\{ C_{jkmn}^{ep} + \frac{(1-f)^2}{f} \left[ K I_{jkmn} - \frac{K_1}{3K_s} C_{jkmn}^{ep} \right] \delta_{km} \right\} \delta_{ip} n_m n_k + (1-f) K_1 I_{jkmn} N_{ip} \delta_{km} n_m n_k \right] \cdot \begin{Bmatrix} q_p^s \end{Bmatrix} = 0, \tag{30}$$

要得到(30)式中  $\begin{Bmatrix} q_p^s \end{Bmatrix}$  的非零解, 有则仅有

$$\det \left[ \left\{ C_{jkmn}^{ep} + \frac{(1-f)^2}{f} \left[ K I_{jkmn} - \frac{K_1}{3K_s} C_{jkmn}^{ep} \right] \delta_{km} \right\} \delta_{ip} n_m n_k + (1-f) K_1 I_{jkmn} N_{ip} \delta_{km} n_m n_k \right] = 0, \tag{31}$$

式(31)为有效应力描述的多孔介质应变局部化萌生条件•

## 5 算 例

本节以平面应变问题的例子说明多孔介质中液相流动速度、方向对固相应变局部化的影响• 首先介绍了单相介质内某一应力作用下应变局部化萌生条件, 随后, 在单相介质应变局部

化条件的基础上, 讨论了多孔介质中两种液相运动方式的固相应变局部化萌生条件。

单相介质和有效应力描述的固相部分的初始弹性模量为  $21\ 000\text{ kg/cm}^2$ 、泊松比为  $0.3$ 、孔隙比为  $0.4$ 、水的压缩模量为  $20\ 000\text{ kg/cm}^2$ 。弹塑性阶段采用 Drucker-Prager 相关联塑性模型, 屈服面函数为:

$$J(\sigma, k) = \alpha I_1 + \sqrt{J_2} - k, \tag{32}$$

其中,  $\alpha = 0.13, k = 15\text{ kg/cm}^2$ , 塑性软化模量  $H = 500\text{ kg/cm}^2$ 。

单相介质

当单相介质体内某点应力值为:

$$\{\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \sigma_{xy}, \sigma_{yz}, \sigma_{zx}\} = \{0.0834, -26.74, -49.77, 0, 0, -0.35\}$$

时, 体内将出现应变局部化。其声学张量行列式值随滑移面的法线与  $z$  轴的夹角  $\alpha_z$  的变化曲线见图 1。从图中可以看出, 当  $\alpha_z = 34.6^\circ$  和  $\alpha_z = 145.4^\circ$  时, 声学张量的行列式的值为 0。本文取滑移面的法线与  $z$  轴的夹角为  $145.4^\circ$  来分析, 沿界面滑移的方向与  $z$  轴的夹角为  $235.4^\circ$ , 见图 2。

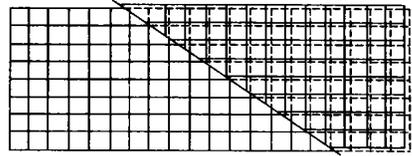
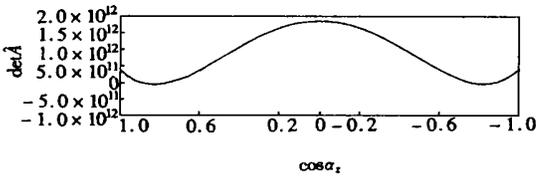


图 1 声学张量的行列式的值随  $\alpha_z$  的变化(单相介质)

图 2 单相介质内应变局部化

饱和多孔介质: 相同方向

应用单相介质模型, 在相同的应力水平作用下, 讨论固液两相运动方向相同时固相部分出现应变局部化的萌生条件。固、液两相运动方式与式(31)中  $N_{ij} = 1 (i = j)$  和  $N_{ij} = 0 (i \neq j)$  对应, 声学张量的行列式的值随  $\alpha_z$  变化规律见图 3。

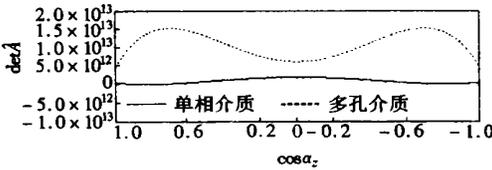


图 3 声学张量的行列式的值随  $\alpha_z$  的变化(方向相同)

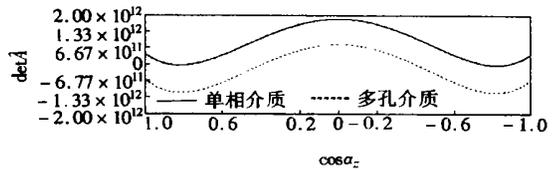


图 4 声学张量的行列式的值随  $\alpha_z$  的变化(方向相反)

图 3 是单相介质和固液运动同向时的固相部分声学张量行列式的变化。可以看到, 固相和液相运动方向相同时, 声学张量行列式的值均大于单相介质的对应值, 说明这种工况固相部分不易出现应变局部化。试验现象也是如此, 地表载荷下覆盖土层底部存在渗透性很大的土层(存在排水边界)情况下, 土层不会出现失稳现象。

但也应看到, 这种工况下的声学张量行列式最小值位于  $\alpha_z = 0^\circ$  和  $\alpha_z = 180^\circ$ , 随着  $m$  值的增大, 固相部分的等效剪切模量逐渐减小和屈服面的逐渐收缩, 会出现垂直于  $z$  轴的滑移面, 即管涌现象; 当  $\alpha_z = 90^\circ$  时, 声学张量行列式的值也较小, 也可能随着骨架的剪切模量逐渐减小和屈服面的逐渐收缩, 出现平行于  $z$  轴的滑移面, 即整体滑坡现象。

### 饱和多孔介质: 相反方向

与固相和液相运动方向相同工况讨论相同, 液相边界条件作相应变化。固、液两相运动方式与式(31)中  $N_{ji} = -2 (i = j)$  和  $N_{ji} = 0 (i \neq j)$  对应。

图4是单相介质和固液运动相反时的固相部分声学张量行列式值的变化。可以看出, 固相和液相运动方向相反时, 声学张量行列式的值均小于单相介质的对应值。说明在这种工况下, 即使土骨架为硬化材料, 固相部分在液相流动的作用下, 也易出现应变局部化形式的失稳破坏, 且滑移面的法线与  $x$  轴的夹角也在变化。  $\alpha_c = 35.61^\circ$  和  $\alpha_c = 144.39^\circ$ 。

## 6 结 论

多孔介质的基体应变局部化破坏是一个复杂的物理力学过程。本文的工作限定在土体为点接触模型、分析过程中温度恒定、孔隙液为纯水、没有溶解传质的条件下, 主要结论如下:

1) 导出了以固相应力表示的多孔介质基体的应变局部化条件。它的形式与单相介质的形式相同, 表面上看起来非常便于应用, 但是基于固相应力描述的本构模型非常有限。

2) 导出了以有效应力表示的多孔介质基体的应变局部化条件。尽管它的形式稍显复杂, 但基于有效应力的本构模型研究有深厚的基础, 应用它对多孔介质破坏现象的研究有很强的优势。

3) 应用有效应力表示的多孔介质基体的应变局部化条件, 讨论了基体服从 Drucker-Prager 模型、固液不同相互运动情况下的基体破坏形式, 诸如管涌、滑坡、泥石流。

4) 点接触模型的多孔介质应变局部化条件是进一步研究点、面、面接触的多孔介质模型破坏、预测地质灾害发生的基础。

### [参 考 文 献]

- [1] Zhang H W, Schrefler B A. Uniqueness and localization analysis of elastic-plastic saturated porous media[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2001, 25 (1): 29—48.
- [2] Rouche N, Habets P, Laloy M. Stability Theory by Liapunov's Direct Method [M]. New York: Springer, 1977, 58—72.
- [3] Bear J. Dynamics of Fluids in Porous Media [M]. New York: American Elsevier Publishing Company, INC, 1972, 54—61.
- [4] 赵纪生. 钢纤维混凝土在灌注桩基工程中的应用[D]. 博士论文. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2001, 103—113.
- [5] 陈少林. 两相介质中近场波动的数值模拟[D]. 博士论文. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2002, 35—44.
- [6] James K M. Fundamentals of Soil Behavior [M]. New York: John Wiley and Sons, INC, 1976, 50—57.

## Onset Condition of Strain Localization in Matrix of Saturated Porous Media

ZHAO Ji\_sheng<sup>1,2</sup>, TAO Xia\_xin<sup>1,2</sup>, SHI Li\_jing<sup>2</sup>, OU Jin\_ping<sup>1</sup>

(1. Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration,  
Harbin 150080, P. R. China;

2. School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology,  
Harbin 150006, P. R. China)

**Abstract:** Based on governing equations of saturated porous media and Liapunov's stability here, onset conditions matrix of porous media used by solid stress and Terzaghi's effective stress constitutive description under seepage flow state, are presented, which have different forms with different representation of the solid phase, matrix or skeleton, constitutive model of porous media. The main difference relates with how to describe the interaction between solid phase and liquid phase in constitutive model. The derived onset condition of strain localization under Terzaghi's effective stress description can be used to interpret different failure types, piping effect, landslides and mudflows, by means of the type and the magnitude ratio of relative movement between solid phase and liquid phase. Examples here illuminate the onset condition of how to work.

**Key words:** porous medium; solid stress; Terzaghi's effective stress; constitutive model of matrix; onset condition of strain localization