

轴对称状态下土体剪切带触发形成的分叉理论

Bifurcation of soils at inception of shear band under axisymmetric conditions

钱建固, 黄茂松

(同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092)

摘要: 室内试验观察到三轴压缩试样在特定的应力状态下有剪切带的出现, 但这种轴对称状态的土体失稳现象从理论上一直没有得到严格的验证。鉴于此, 本文基于分叉理论对土体轴对称试样失稳问题作了详细的理论解析, 证明了剪切带触发形成的必要条件, 然后对完全排水条件下密砂三轴压缩试样进行分析, 通过与室内试验结果进行对比, 验证了本文理论解析的合理性。

关键词: 应变局部化; 剪切带; 分叉理论; 三轴压缩试验; 排水密砂试样

中图分类号: TU 43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2003)04-0400-05

作者简介: 钱建固(1972-), 男, 安徽无为, 人, 博士, 从事软土工程与变形局部化理论的研究工作。

QIAN Jian-gu, HUANG Mao-song

(Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: This paper presents an interpretation of the bifurcation criteria required for shear band inception in a soil mass subjected to bifurcated deformations in a triaxial compression state, and the results are obtained based on the theory of finite deformations. The criteria are applied to analyze a dense sand specimen in the drained state of triaxial compression. The calculated results in uniform deformation mode are also given. Numerical calculations exhibit a good overall agreement with experimental observations for the inception of the localization and the mechanical response before the onset of bifurcation.

Key words: strain localization; shear band; bifurcation theory; triaxial compression test; drained dense specimen

0 前言*

在自然界, 物理、化学以及工程问题都存在分叉现象。对于工程中的变形问题, 无论是几何非线性问题, 还是材料非线性问题都可能存在分叉现象。典型的几何分叉问题如压杆稳定问题。而砂土试样在剪切过程中剪切带的形成则可归结为材料非线性的分叉问题, 即土体的应力应变关系产生分叉。如图1所示, 土体的本构特性在A点产生分叉现象, 可能沿着AB方向继续发展并表现为均匀变形的硬化趋势, 也可能沿着AC方向发展表现为非均匀变形的软化趋势。对于土体这种本构特性的分叉现象, Mandel(1964)^[1]首先从理论上证明了它的存在性。

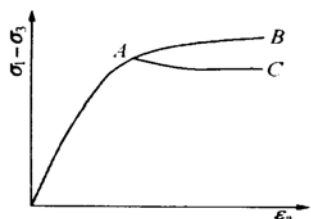


图1 土体应力应变关系的分叉现象

Fig. 1 Stress-strain bifurcation characteristics of a soil sample subjected to localized strain

土体内部剪切带的形成可以用应变局部化理论加以解释, 应变局部化理论是分叉理论的一个前沿领

域, 这种典型的土体塑性失稳现象, 虽然早已为室内试验观察到, 但是从理论上来加以分析只是在近一二十年内才受到广泛的重视。

应变局部化理论的最基本问题应该是应变局部化产生的条件, 其理论框架大部分是建立在 Hill(1958, 1962)^[2,3]给出的力学模型上。Rudnicki 和 Rice(1975)^[4]首先提出了确定单相固体介质的应变局部化准则。结合干砂的平面应变试验, Vardoulakis(1980)^[5]将 Rudnicki 和 Rice 的准则用于干密砂的局部化变形分析。然而, 从目前应变局部化理论的研究现状来看, 国际上多数集中在平面问题的分析上(Vermeer, 1990; Alsiny 等, 1992; Han 等, 1993; Finno 等, 1997)^[6-9], 而轴对称问题一般只是停留在试验研究(Hettler 等, 1984; Sulem 等, 1990; Desrues 等, 1996; Karen 等, 2000; Papamirchos 等, 2001)^[10-14]。Chu 等(1996)^[15]通过真三轴的试验研究认为, 当围压 $\sigma_2 = \sigma_3$ 时(此时试样内部的应力状态与轴对称状态相同), 将不会有剪切带的出现。然而 Desrues(1996)^[12]通过三轴压缩试验并采用 CT 切片技术观测发现, 土样在轴对称状态下剪切带是可以

* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50179025); 教育部高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(2000024724); 上海市科学技术发展基金项目(005111056); 上海市重点学科建设基金资助项目

收稿日期: 2002-09-24

出现的,甚至还会呈现对称的“中心圆锥”状。鉴于目前国内外学者对土样在轴对称状态下剪切带触发形成问题仍存在争议,因此本文基于土体变形的分叉理论对轴对称状态下剪切带形成机理作进一步的理论探讨。

1 剪切带形成的应变局部化准则

1.1 剪切带触发形成的一般解析

对于一个含有剪切带的试样,不妨将整个试样分成两个区域:剪切带区(应变集中区)和带外区(应变均匀区)。当剪切带出现时,带内产生明显的变形局部化,设带内产生附加速度场 $\tilde{v}_i$,并在带内产生相应的附加应力率场 $\dot{\sigma}_{ij}$ 。由于在剪切带的边界处应满足静力平衡条件,而带外没有附加应力率,所以剪切带的静力边界方程为

$$\dot{\sigma}_{ij} n_j = 0, \quad (1)$$

这里, $\dot{\sigma}_{ij}$ 为 Cauchy 应力率, n_j 表示剪切带外法线方向。符号“~”表示带内相对于带外的附加值,下文同。

考虑到在有限变形的条件下,弹塑性增量型本构采用客观的 Jaumann 应力率 $\dot{\sigma}_{ij}$ 形式,即

$$\dot{\sigma}_{ij} = D_{ijkl} \dot{\epsilon}_{kl} = \frac{1}{2} D_{ijkl} (\tilde{v}_{k,l} + \tilde{v}_{l,k}), \quad (2)$$

这里, D_{ijkl} 为弹塑性模量张量, $\dot{\epsilon}_{kl}$ 为附加速度场 $\tilde{v}_i$ 在带内产生相应的附加应变率场 $\dot{\epsilon}_{kl} = \frac{1}{2} (\tilde{v}_{k,l} + \tilde{v}_{l,k})$ 。

根据连续介质力学的有限变形理论, Cauchy 应力率 $\dot{\sigma}_{kl}$ 与 Jaumann 应力率 $\dot{\sigma}_{ij}$ 有如下关系:

$$\dot{\sigma}_{ij} = \dot{\sigma}_{ij} - \sigma_{ik} \omega_{kj} - \sigma_{jk} \omega_{ki}, \quad (3)$$

式中, ω_{ij} 表示带内的附加旋率, $\omega_{ij} = \frac{1}{2} (\tilde{v}_{i,j} - \tilde{v}_{j,i})$ 。

联合式(2), (3)得

$$\dot{\sigma}_{ij} = \frac{1}{2} D_{ijkl} (\tilde{v}_{k,l} - \tilde{v}_{l,k}) - \frac{1}{2} \sigma_{ik} (\tilde{v}_{k,j} - \tilde{v}_{j,k}) - \frac{1}{2} \sigma_{jk} (\tilde{v}_{k,i} - \tilde{v}_{i,k}). \quad (4)$$

这里将附加变形梯度场表示成

$$\tilde{v}_{i,j} = g_i n_j, \quad (5)$$

n_j 表示剪切带外法线方向, g_i 为附加变形梯度的各分量。将式(5)代入式(4),再将式(4)代入方程式(1)得

$$\left[n_j D_{ijkl} n_l + \sigma_{ij} n_j n_k - \frac{1}{2} (\sigma_{ik} + \sigma_{jk} n_j n_i - \sigma_{ik} n_j n_k - \sigma_{jl} \delta_{ik} n_j n_l) \right] g_k = 0, \quad (6)$$

这里, δ_{ij} 为 Kronecker 张量, $\delta_{ij} = \begin{cases} 1, & i = j \\ 0, & i \neq j \end{cases}$ 。

显然,要保证方程式(6)存在非零解,即 $g_k \neq 0$, 其必要条件为

$$\det [n_j D_{ijkl} n_l + \sigma_{ij} n_j n_k - \frac{1}{2} (\sigma_{ik} + \sigma_{jk} n_j n_i - \sigma_{jk} n_j n_k - \sigma_{jl} \delta_{ik} n_j n_l)] = 0. \quad (7)$$

在小变形条件下,可将含有应力项的分量予以忽略,则式(7)可以进一步简化为

$$\det (n_j D_{ijkl} n_l) = 0, \quad i, j, k, l = 1, 2, 3. \quad (8)$$

式(7)与式(8)分别表示有限变形情况与小变形情况下触发剪切带产生的必要条件。

1.2 轴对称问题的解析

任意轴对称问题,其应力分量有 σ_r 、 σ_θ 、 σ_z 和 τ_{rz} 。同时对于均匀变形的土样在轴对称状态下形成的剪切带面也应是轴对称状的,即 $n_\theta = 0$ 。代入方程(1)得

$$\dot{\sigma}_r n_r + \tau_{rz} n_z = 0, \quad (9)$$

$$\tau_{rz} n_r + \dot{\sigma}_z n_z = 0. \quad (10)$$

注意到 $\dot{\sigma}_{ij} = \dot{\sigma}_{ij} - \sigma_{ik} \tilde{\omega}_{kj} - \sigma_{jk} \tilde{\omega}_{ki}$, 所以式(9), (10)可分别写成

$$\dot{\sigma}_r n_r + \tau_{rz} n_z + \frac{1}{2} (\sigma_r - \sigma_z) (\tilde{v}_{z,r} - \tilde{v}_{r,z}) n_z = 0, \quad (11)$$

$$\tau_{rz} n_r + \dot{\sigma}_z n_z + \frac{1}{2} (\sigma_r - \sigma_z) (\tilde{v}_{z,r} - \tilde{v}_{r,z}) n_r = 0. \quad (12)$$

考虑轴对称问题的应力应变关系:

$$\begin{bmatrix} \dot{\sigma}_r \\ \dot{\sigma}_\theta \\ \dot{\sigma}_z \\ \dot{\tau}_{rz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{rrrr} & D_{rr\theta\theta} & D_{rrzz} & D_{rrrz} \\ D_{\theta\theta rr} & D_{\theta\theta\theta\theta} & D_{\theta\theta zz} & D_{\theta\theta rz} \\ D_{zzrr} & D_{zz\theta\theta} & D_{zzzz} & D_{zzrz} \\ D_{rzzr} & D_{r\theta\theta r} & D_{rzzz} & D_{rzzr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\epsilon}_r \\ \dot{\epsilon}_\theta \\ \dot{\epsilon}_z \\ \dot{\gamma}_{rz} \end{bmatrix}, \quad (13)$$

这里, 剪应变 $\dot{\gamma}_{rz} = \dot{\epsilon}_z + \dot{\epsilon}_r = 2 \dot{\epsilon}_z$ 。

考虑到一个轴对称试样,在剪切带触发形成的瞬时,其应力应变状态仍保持均匀,所以有 $\dot{\epsilon}_r = \dot{\epsilon}_\theta$ 。对于 $\tau_{rz} = 0$ 的轴对称问题,按照本构理论的正交流动法则,则有 $D_{rrrr} = D_{rrzz} = 0$, $D_{r\theta\theta r} = D_{\theta\theta rz} = 0$, $D_{rrzz} = D_{zzrr} = 0$ 。令 $s = \frac{1}{2} (\sigma_r - \sigma_z)$ 并注意到表达式(5),将式

(13)代入式(11), (12), 则式(11), (12)可联合写成

$$\begin{bmatrix} (D_{rrrr} + D_{rr\theta\theta}) n_r^2 + (D_{rrzz} - s) n_z^2 & (D_{rrzz} + D_{rrrz} + s) n_r n_z \\ (D_{zzrr} + D_{zzr\theta} + D_{z\theta\theta z} - s) n_r n_z & D_{zzzz} n_z^2 + (D_{zzrr} + s) n_r^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} g_r \\ g_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (14)$$

若方程(14)存在非零解(非平凡解),即 $\begin{bmatrix} g_r \\ g_z \end{bmatrix} \neq \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}$,

则需要保证

$$\det \begin{vmatrix} (D_{rrr} + D_{rr0}) n_r^2 + (D_{rrz} - s) n_z^2 & (D_{rrz} + D_{rrz} + s) n_r n_z \\ (D_{zrr} + D_{zrr} + D_{z00} - s) n_r n_z & (D_{zzz} n_z^2 + (D_{zrz} + s) n_r^2 \end{vmatrix} = 0. \quad (15)$$

对式(15)进行整理得

$$A \tan^4 \beta + B \tan^2 \beta + C = 0, \quad (16)$$

上式中, $\tan \beta = n_r / n_z$, β 为剪切带与坐标轴 r 的夹角,

$$A = (D_{rrr} + D_{rr0})(D_{zrz} + s), B = D_{zzz}(D_{rrr} + D_{rr0}) - D_{rrz}(D_{zrr} + D_{z00}) - D_{zrz}(D_{zrr} + D_{z00} + D_{z00}) + s(D_{rrz} - D_{zrr} - D_{z00}), C = D_{zzz}(D_{zrz} - s).$$

当方程(16)开始有实解时,则意味着剪切带的触发形成。此时方程(16)必须满足 $B/A \leq 0$, 且 $B^2 - 4AC = 0$ 。而相应的剪切带倾角为 $\beta = \pm \arctan \sqrt{C/A}$ 。

值得一提的是,本文在以上的理论推导以及下文的数值模拟中,按照连续介质力学的一般原则,规定应力和应变均以拉为正。

2 计算分析与试验验证

为了对本文的理论解析加以验证,这里采用加拿大 McMaster 大学(Chan, 1986)^[16] 一组 Ottawa 密砂三轴压缩($\sigma_1 < 0, \sigma_2 = \sigma_3 < 0$)试验结果加以验证,试验是在完全排水条件进行的,试样初始孔隙比 $e = 0.54$,初始有效围压 206 kPa。本构模型选用 Pietruszczak 等(1987)^[17] 提出的砂土弹塑性模型。在三轴压缩条件下,其屈服函数和塑性势函数可简化为 $F = q - Mp = 0, Q = q - M_e p \ln \frac{p}{p_0} = \text{const}$ 。

考虑到轴对称问题,这里 $q = \sigma_3 - \sigma_1, p = (\sigma_1 + 2\sigma_3)/3, p_0$ 可取为 p 的初始状态, $M = M_f \epsilon_r^e / (A + \epsilon_r^e)$, 其中 $\epsilon_r^e = \frac{2}{3}(\epsilon_r^e - \epsilon_r^e), A, M_f$ 和 M_e 为材料参数。

作为验证,我们选择了如下的一组模型参数: $M_f = 1.69, M_e = 0.40, A = 0.00038, E = 78.75 \text{ MPa}, \nu = 0.3125$, 其中, E 和 ν 分别表示 Young 氏模量和 Poisson 比。以上参数的选择是通过试验曲线拟合得到的。

本文在数值模拟时,没有针对土样分叉后的非均匀变形的应力应变关系作进一步的理论预测,有关内容作者将另文探讨。

图 2(a) 给出了三轴完全排水应变控制条件下的 $\sigma_3 - \sigma_1$ (偏应力) 和 $2(\epsilon_3 - \epsilon_1)/3$ (偏应变) 的试验曲线(实线)以及均匀变形条件下的理论预测曲线(虚线)。

图 2(b) 给出了三轴完全排水应变控制条件下的 $\epsilon_1 + 2\epsilon_3$ (体应变) 和 $2(\epsilon_3 - \epsilon_1)/3$ (偏应变) 的试验曲线(实线)和均匀变形条件下的理论预测曲线(虚线)。图

中的黑色圆圈“●”表示剪切带出现的位置(分叉点)。

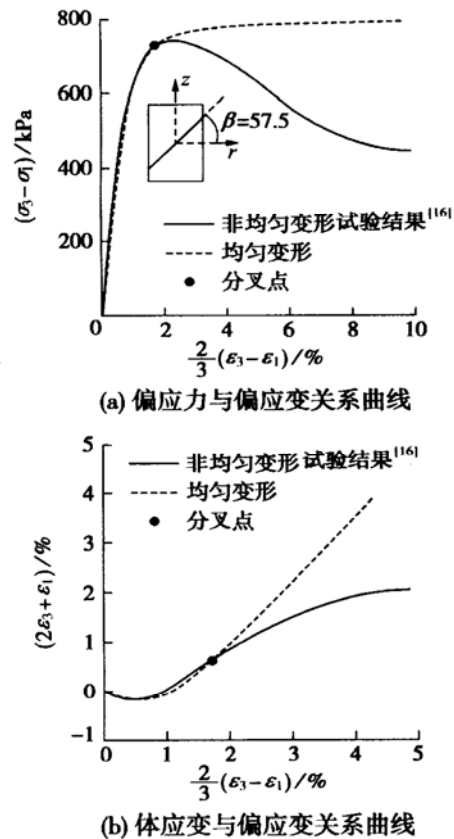


图 2 排水条件下三轴压缩试验干密砂的力学特性

Fig. 2 Drained response of a dense sand specimen subjected to triaxial compression

从图 2 可以看到,在剪切带出现前理论预测曲线与试验曲线基本一致,而一旦剪切带触发形成后,应力应变路径随即发生分叉:沿着试验曲线(实线)土样内部开始发生不均匀变形,表现为明显的软化发展趋势;若土样一直保持均匀变形,则本文的理论预测结果将是沿着虚线的趋势发展,并表现为硬化特性。理论预测剪切带发生在偏应变为 1.71% 的位置,也正好是两种应力应变曲线分叉的位置。

试验观测到的剪切带面方向与 r 轴向的夹角为 57.5° ,而理论预测的角度为 57.1° ,显然剪切带方向的理论预测值也是与试验观测值相吻合。

图 3 进一步从理论上分析了初始围压 σ_3 对剪切带角度 β 值的影响。图中显示在围压很小时($-\sigma_3 < 100 \text{ kPa}$),无论是在小变形条件下还是在有限变形条件下剪切带的角度都随着围压增大迅速增加。当围压维持在一定的水平以上,继续增加围压对剪切带的角度影响明显减小,但此时两种变形理论预测剪切带方向的变化趋势是不同的,在小变形的情形下,剪切带的角度继续缓慢增大,而考虑到有限变形的影响,剪切带角度呈现缓慢减小的趋势。当围压 $-\sigma_3 > 300 \text{ kPa}$,二

者之间已经存在明显的误差,这种误差随着围压的增大而增大。

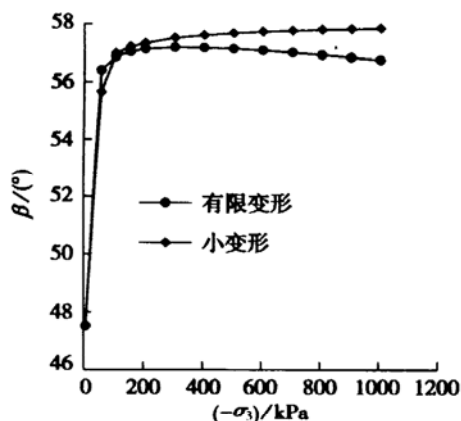


图3 剪切带角度与围压的关系曲线

Fig. 3 Inclination angle of shear band vs. confining pressure

遗憾的是由于没有足够的轴对称试验结果对图3中的理论预测曲线加以对比与验证。但从已有的平面应变试验的观测结果来看,如Han等(1993)^[8]对Ottawa粗密干砂所做的试验研究,剪切带角度总的趋势是随着围压的增加而减小,围压水平越低这种趋势越明显。Han^[8]和Papamichos(1995)^[18]等认为,由于传统的弹塑性本构理论是建立在正交流动法则的基础上,没能考虑到塑性应变增量与应力的非共轴性,所以导致了随着围压的增加剪切带的角度也随之增大的计算结果。Pradel(1990)^[19]等通过试验研究证实了在围压水平较低时应力与塑性应变增量确实存在明显的非共轴性,但试验研究同时也表明,随着围压的增大应力与应变增量的非共轴性将明显减弱。在图3中,从有限变形理论的预测结果来看,当围压 $-\sigma_3 > 150$ kPa,这种非共轴性引起的规律性误差不再明显,并随着围压的增大,理论预测曲线表现为与Han等(1993)^[8]试验研究相同的规律,比较而言小变形理论的预测效果不如有限变形理论。可见在围压较低时,对剪切带方向的预测应考虑采用非共轴性的弹塑性本构模型,而在围压水平较高时,采用常规(即正交流动法则)的弹塑性本构模型即可,但是必须采用有限变形理论加以分析,而小变形理论的预测趋势将产生明显的误差。

3 结 语

本文提出的轴对称条件下剪切带触发形成的土体变形分叉理论,其理论解析不同于一般的平面应变形式^[6,7,18,20],通过理论分析证明了轴对称状态下剪切带存在的可能性,并与室内试验结果进行了对比。对比结果表明,在剪切带出现前应力应变关系的理论预测与试验结果是吻合的,剪切带形成的方向性也与试验

观测结果一致,从而验证了本文所给出的理论解析是合理的。理论分析进一步表明,当围压水平很低时,采用正交流动法则的本构理论对剪切带方向的预测与平面应变试验所观测到的规律不符,但在围压水平较高时,采用有限变形理论预测剪切带的方向可以得到与试验观测相同的规律。

进一步的研究将包括采用一种合理本构模型和相应的数值方法来预测剪切带触发形成后的变形特性,这种合理的土体本构模型应该能够反映密实砂土和超固结粘土产生软化性状的真实机理,它是当前局部化理论的热点也是难点,国际上有许多学者都致力于这方面的研究^[21-24],国内也有一些学者^[25-29]也在这方面展开各自的理论研究。但总的来看,尽管其中的一些理论研究方法值得借鉴,然而多数只是停留在初步的理论探讨上,模型中涉及的某些参数并没有明确的物理意义。因此,对剪切带形成后土体的非均匀变形机理作进一步的研究和探讨是非常有必要的。

参考文献:

- [1] Mandel J. Conditions de stabilité et postulate de drucker[A]. IU-TAM symposium on rheoretical and applied mechanics[C]. Grenoble, 1964. 58-68.
- [2] Hill R. A general theory of uniqueness and stability in elastic-plastic solids[J]. J Mech Phys Solids, 1958, 6: 236-249.
- [3] Hill R. Acceleration waves in solids[J]. J Mech Phys Solids, 1962, 10: 1-16.
- [4] Rudnicki J W, Rice J R. Conditions for the localization of the deformation in pressure sensitive dilatant materials[J]. J Mech Phys Solids, 1975, 23: 371-394.
- [5] Vardoulakis I. Shear band inclination and shear modulus of sand in biaxial tests[J]. Int J Num Analyt Meth Geomechanics, 1980, 4: 103-119.
- [6] Vermeer P A. The orientation of shear bands in biaxial tests[J]. Geotechnique, 1990, 40(2): 223-236.
- [7] Alsinv A, Vardoulakis I, Drescher A. Deformation localization in cavity inflation experiments on dry sand[J]. Geotechnique, 1992, 42(3): 395-410.
- [8] Han C, Drescher A. Shear bands in biaxial tests on dry coarse sand[J]. Soils and Foundations, 1993, 33(1): 118-132.
- [9] Finno R J, Harri W W, Mooney M A, Viggiani G. Shear bands in plane strain compression of loose sand[J]. Geotechnique, 1997, 47(1): 149-165.
- [10] Hettler A, Vardoulakis I. Behaviour of dry sand tested in a large triaxial apparatus[J]. Geotechnique, 1984, 34(2): 183-198.
- [11] Sulem J, Vardoulakis I. Bifurcation analysis of the triaxial test on rock specimens[J]. Acta Mech, 1990, 83: 195-212.
- [12] Desrues J, Chambon R, Mokni M, Mazerolle F. Void ratio ev-

- olution inside shear bands in triaxial sand specimens studied by computed tomography[J]. *Geotechnique*, 1996, **46**(3): 529–546.
- [13] Karen M, Ian M, Stephen E. Sequential growth of deformation bands in the laboratory[J]. *Journal of Structural Geology*, 2000, **22**: 25–42.
- [14] Panamichos E, Vardoulakis I, Heil L K. Overburden Modeling Above a Compacting Reservoir Using a Trap Door Apparatus[J]. *Phys Chem Earth (A)*, 2001, **26**(1–2): 69–74.
- [15] Chu J, Lo S C R, Lee I K. Strain softening and shear band formation of sand in multi-axial testing[J]. *Geotechnique*, 1996, **46**(1): 63–82.
- [16] Chan L G. Analysis of deformation of strain softening material[D]. McMaster University, Canada, 1986.
- [17] Pietruszczak S, Stolle D F E. Modelling of sand behavior under earthquake excitation[J]. *International Journal for Numerical and Analytical Method in goemechanics*, 1987, **11**: 221–240.
- [18] Papamichos E, Vardoulakis I. Shear band formation in sand according to non-coaxial plasticity model[J]. *Geotechnique*, 1995, **45**(4): 649–661.
- [19] Pradel D, Ishihara K, Gutierrez M. Yielding and flow of sand under principal axes rotation[J]. *Soils and Foundations*, 1990, **30**(1): 87–89.
- [20] Leroy Y, Ortiz M. Finite element analysis of strain localization in frictional materials[J]. *International Journal for Numerical and Analytical Method in goemechanics*, 1989, **13**: 53–74.
- [21] De Borst R, Sluys L J. Localisation in a Cosserat continuum under static and dynamic loading conditions[J]. *Comp Meth Appl Mech Eng*, 1991, **90**: 805–827.
- [22] Pietruszczak S, Mroz Z. Finite element analysis of deformation of strain softening materials[J]. *Int J Numer Methods Engng*, 1981, **17**: 327–334.
- [23] Bazant Z P, Pijaudier-Cabot G. Non-local continuum damage, localization instability and convergence[J]. *J Appl Mech, ASME*, 1988, **55**: 287–293.
- [24] Needleman A. Material rate dependence and mesh sensitivity in localization problems[J]. *Comp Meth Appl Mech Eng*, 1987, **67**: 68–85.
- [25] Huang M, Pietruszczak S. Numerical modelling of localized deformation in saturated soils[A]. *Proc 9th Int Conf on Computer Methods and Advances in Geomechanics*[C]. Rotterdam: Balkema, 1997. 427–432.
- [26] 宋二祥. 软化材料有限元分析的一种非局部方法[J]. *工程力学*, 1995, **12**(4): 93–101.
- [27] 李锡夔, Cescotto S. 梯度塑性的有限元分析及应变局部化分析[J]. *力学学报*, 1996, **28**(5): 575–584.
- [28] 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.
- [29] 黄茂松, 钱建固, 吴世明. 饱和土体应变局部化的复合理论[J]. *岩土工程学报*, 2002, **24**(1): 21–25.

请订阅《岩土工程学报》

《岩土工程学报》创办于 1979 年, 是我国水利、土木、力学、建筑、水电、振动等六个全国性学会联合主办的核心期刊。由南京水利科学研究院承办, 国内外公开发行人。主要刊登土力学、岩石力学领域中能代表我国理论和实践水平的论文、报告、实录等。报道新理论、新技术、新仪器、新材料的研究和应用。欢迎国家自然科学基金项目及其他重要项目的研究成果向本刊投稿, 倡导和鼓励有实践经验的作者撰稿, 并优先刊用这些稿件。主要栏目有论文、短文、工程实录、展望 21 世纪岩土力学、焦点论坛、学术讨论和动态简讯等。

本刊 1999 年、2001 年两次获“自然科学基金性、高科技学术期刊经费”资助; 本刊于 1992 年、1996 年、2000 年 3 次被确认为我国核心期刊; 本刊被《中国学术期刊文摘》、《中国科学引文数据库》、《中国科技论文统计与分析数据库》收录; 本刊被美国《工程索引》(Ei) 确认为 Ei Page One 数据库收录期刊; 本刊被 Geotechnical Engineering International Resources Center(GE-IRC) 确认为岩土工程核心期刊。

凡本刊刊登的文稿均收入相应光盘版及 Internet 网。

本刊读者对象为土木建筑、水利电力、交通运输、矿山冶金、工程地质等领域中的科研人员、设计人员、施工人员、监理人员和大专院校师生。

本刊为双月刊, 大 16 开本, 双栏排版, 120 页左右, 单月 30 日出版。每期定价 10 元, 全年 60 元。漏订或补缺者请向编辑部邮购。

本刊国际标准刊号 ISSN 1000–4548, 国内统一刊号 CN32–1124/TU, 国内发行代号 28–62, 国外发行代号 BM520。

本刊还承办广告业务, 欢迎惠顾。

编辑部地址: (210024) 南京虎踞关 34 号

(南京水利科学研究院土工所内)

电话: (025) 5829553, 5829556 传真: (025) 5829555

E-mail: ge@njhri.edu.cn

网址: <http://www.cejournal.com> 或 <http://ytgc.chinajournal.net.cn>

(本刊编辑部)