

文章编号: 1000-7598-(2012)09-2803-08

结构性黄土二元介质本构模型 在局部化剪切带中的应用

李宏儒, 胡再强, 冯 飞, 刘 寅

(西安理工大学 岩土工程研究所, 西安 710048)

摘 要: 基于破损力学理论, 将结构性黄土抽象成具有一定结构强度的结构块和摩擦带组成的二元介质模型。对结构性黄土体来说, 局部化剪切带问题也是土体的破损问题, 剪切带萌生发展的实质就是结构块向摩擦带转化的动态过程。应用结构性黄土的双参数破损率二元介质本构模型, 采用数值分析方法模拟了平面应变压缩条件下结构性土中局部化剪切带萌生、扩展的过程, 研究了不同缺陷方案下局部化剪切带的形态、特性与规律, 发现结构性土中局部化剪切带的发展起初是由一段段不连续的微小局部破坏区域在外荷载逐步作用下渐进扩展连接贯通而形成整体剪切带的破坏形式。二元介质本构模型和常规有限元的结合, 形象生动地再现了局部化剪切带萌生、发展的过程。

关 键 词: 结构性黄土; 二元介质模型; 双参数破损率; 局部化剪切带; 有限元模拟

中图分类号: TU 411

文献标识码: A

Application of structural loess binary-medium model to localization shear band

LI Hong-ru, HU Zai-qiang, FENG Fei, LIU Yin

(Institute of Geotechnical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: Based on the theory of breakage mechanics, the structural loess is conceptualized as binary-medium model consisting of bonding brick and frictional band. Shear band is structural loess' breakage, localization band sprout and development is dynamic process that bonding brick is translating into frictional band. Applying the double parameter breakage ratio binary-medium model of structural loess, the process of structural loess localization band sprouting and expanding is simulated with the numerical simulations method, the localization shear band shape, speciality and law under different disfigurement project are studied; it is found that the strain localization on a shear band of structural soil at originally is some sets discontinuous little local breakage area step by step developed, connected and formed the shape of whole destruction with the external load increased. Combining binary-medium model with general finite elements, visual reappeared the course of the local shear band germination and progress.

Key words: structural loess; binary-medium model; double parameter breakage ratio; localization shear band; finite element simulation

1 引 言

大量的理论研究和工程实践都表明, 剪切带的产生会在很大程度上降低材料的承载力, 影响土体结构的稳定性。但岩土体中剪切带的出现是一个由局部破坏逐渐扩展以至贯通形成滑面的渐进式过程^[1]。从 20 世纪 80 年代起, 岩土材料的变形局部化研究逐渐得到人们的重视, 尤其是对软土、砂土

中剪切带的研究掀起了一个高潮, 而结构性黄土中局部化剪切带的研究由于受到黄土特殊的结构性的影响, 其研究目前还没有取得很大的突破, 而随着结构性深入的研究, 其成果将为结构性黄土中局部化剪切带的研究提供基础条件。因此, 在对承载力和变形要求日益严格的今天, 关注结构性黄土中局部化剪切带萌生、发展的过程越来越具有重要的实际意义。

收稿日期: 2012-06-27

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 50778152); 陕西省教育厅科学研究计划项目 (No. 2010JK717); 西安理工大学博士启动基金 (No. 106-210926)。

第一作者简介: 李宏儒, 男, 1972 年生, 博士, 讲师, 主要从事岩土力学数值仿真方面的研究。E-mail: LHRBJ@xaut.edu.cn

土体剪切带的研究方法主要有理论研究、物理试验和数值模拟等 3 种。理论研究主要有分叉理论^[2]、应变局部化理论^[3]、非局部应变理论^[4]、损伤理论^[5]等。这些理论多用在砂土和黏土中^[6-10]，而在结构性黄土中鲜有见到，也难以反映黄土的结构性。剪切带出现在试样体内结构最薄弱的位置，相对于三轴试验来说，在平面应变条件下试样较容易出现剪切带，也比较容易在试验过程中被捕获，因此，关于土体剪切带特性的大量研究过去主要集中在平面应变试验上，而平面应变试验的缺点是剪切带的延伸方向惟一确定。随着测量技术的提高，三轴试验中局部化剪切带的研究得到充分的发展。李元海等^[11]提出基于数字照相量测和图像相关性分析技术的土体剪切带识别方法；Sun 等^[12]进行密砂的真三轴试验，分析了不同应力路径对砂的软化特性和剪切带形成的影响；Wang 等^[13]通过真三轴试验研究了应力状态对砂变形局部化的影响；王助贫等^[14]以粉煤灰作为试验土体，利用数字图像测量技术的面场特性，研究三轴试样剪切带的形态、出现剪切带试样的应力-应变特性以及剪切带的形成条件和影响因素。特别是邵龙潭^[15]、Oda^[16]等用光学方法和 X 光研究了剪切带的微结构，观测到了局部化剪切带萌生、发展的特征，但这些研究的对象也多是砂土和软土，结构性黄土中剪切带的试验研究少有见到。局部化剪切带的数值模拟可以重复再现剪切带萌生、发展的过程，对剪切带认识与研究具有试验无法完成的作用。目前，能够描述剪切带力学性状的方法主要有 3 类^[17]：①弱非连续（即应变非连续）形式的假设应变有限元法，②强非连续（即位移非连续）形式的假设应变有限元方法，③基于体积平均意义提出的复合体方法。故现在比较流行的有：将广义弥散裂纹模型——剪切带理论与常规有限元结合的方法，嵌入非连续的有限元方法，扩展有限元法^[18]和网格自适应技术^[19]及离散元^[20]等，但这些方法由于技术上的问题，难以得到推广应用，而采用常规有限元法并将带内、外材料进行均匀化的数值模拟方法值得研究。

本文利用二元介质本构模型^[21-22]结合有限元的方法，分析结构性黄土中剪切带的萌生、扩展规律。首先，将结构性岩土材料抽象为由胶结块和软弱带构成的二元介质，前者可用弹脆性元模拟，后者可用弹塑性元件模拟，受力过程中弹脆性元逐渐破损并转化为弹塑性元；其次，二元介质是一种非均匀介质，可应用非均质材料的均匀化理论来推导其应力-应变关系，其中破损参数的演化规律反映了

单元内胶结块向软弱带转化的规律，符合复合体理论，也可反映土体中局部化剪切带出现时应变软化现象。

2 双参数二元介质本构模型

对于结构性黄土，剪切破坏往往以剪切带的形式出现，故土体中的破损将沿某局部面发展，利用二元介质模型，除了定义的体积破损率 λ_v 以外，尚需另外定义一个面积破损率 λ_s 。单元的体积模量 K 和剪切模量 G 的表达式为

$$\left. \begin{aligned} K &= (1 - \lambda_v)K_i + \lambda_v K_f \\ G &= (1 - \lambda_s)G_i + \lambda_s G_f \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中： λ_v 和 λ_s 分别为体积破损参数和面积破损参数； K_i 和 G_i 分别代表原状土样加荷开始处于弹性阶段时土体的体积模量和剪切模量，其在土体加荷过程中认为不再改变； K_f 和 G_f 分别为重塑土样加载过程中的体积模量和剪切模量， K_f 、 G_f 随荷载而增加，通过试验测定^[23]，其体积破损率 λ_v 与面积破损率 λ_s 的演化规律将如下式：

$$\lambda_v = \frac{K_i - K}{K_i - K_f}, \quad \lambda_s = \frac{G_i - G}{G_i - G_f} \quad (2)$$

对非线性材料，体积模量和剪切模量均可理解为割线模量，并且均随某一量测得到的应变而变化，因此破损参数 λ_v 、 λ_s 也应当是某一应变的函数，其确定方法见图 1。

针对陕西杨凌地区黄土，由双参数的确定方法，结合原状样和重塑样应力-应变试验曲线，求得体积破损率与面积破损率的演化方程为

$$\lambda_v = 1 - (1 - c\varepsilon_v)^\alpha \quad (3)$$

式中：参数 $c = 3.34$ ； $\alpha = 7.25$ ； ε_v 为体积应变。

$$\lambda_s = 1 - \xi e_s^\beta \quad (4)$$

式中：参数 $\xi = 1.0$ ， $\beta = 0.8$ ； ε_s 为剪切应变。

对双参数模型来说，球应力张量和剪应力张量分别对应体积平均和面积平均，故对体积破损和面积破损用不同的破损参数，故双参数剪应力引起的破损模型的刚度矩阵为

$$[D] = \begin{bmatrix} K + \frac{4}{3}G & K - \frac{2}{3}G & K - \frac{2}{3}G & 0 \\ K - \frac{2}{3}G & K + \frac{4}{3}G & K - \frac{2}{3}G & 0 \\ K - \frac{2}{3}G & K - \frac{2}{3}G & K + \frac{4}{3}G & 0 \\ 0 & 0 & 0 & G \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中:

$$\left. \begin{aligned} K &= (1 - \lambda_v) K_i + \lambda_v K_f + (K_f - K_i) \frac{\partial \lambda_v}{\partial \varepsilon_v} \\ G &= (1 - \lambda_s) G_i + \lambda_s G_f + (G_f - G_i) \frac{\partial \lambda_s}{\partial \varepsilon_s} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

这样可将双参数二元介质本构模型应用到有限元的数值计算之中, 为结构性黄土局部化剪切带的数值模拟提供了本构理论关系。

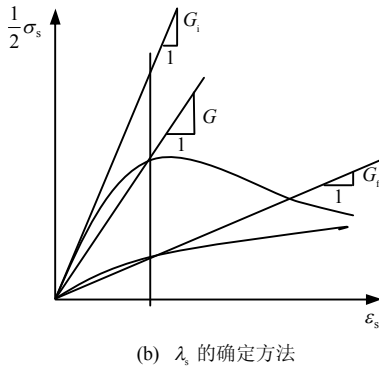
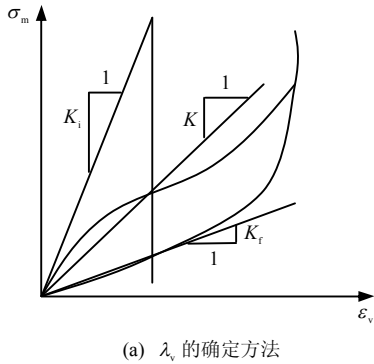


图1 破损参数的确定

Fig.1 Determination of breakage parameter

3 杨凌结构性黄土剪切带数值模拟

剪切带的形成受到试样的密度、均匀性、边界条件等因素的影响, 特别对于土试样, 由于是三相材料, 不均匀以及存在裂隙等缺陷现象是客观存在的, 难以避免。对于结构性黄土试样, 不均匀性和裂隙等缺陷存在, 对剪切带会产生很大的影响, 为了体现这种影响, 特意在模型不同位置设置缺陷, 以期反映缺陷位置不同对剪切带萌生、扩展的影响。

3.1 有限元网格的划分及本构模型

分析的模型为平面应变试验模型, 模型的宽度为 4 cm, 高度为 8 cm, 并分成 $20 \times 40 = 800$ 个 8 节点的四边形二次等参单元, 边界及单元划分形式如图 2 所示。

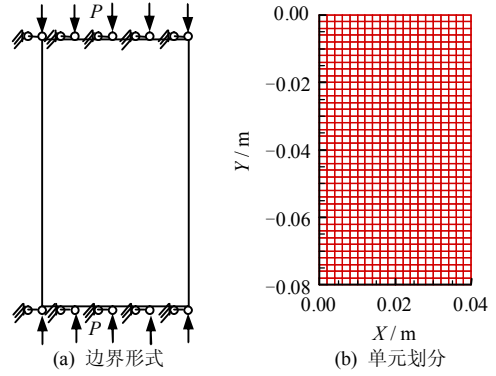


图2 有限元计算模型

Fig.2 Calculation model of finite element

有限元计算模型上下端面只约束水平向, 侧面边界不约束, 试样从上下两个端部同时加荷。为了得到不对称的剪切带图案, 在试样左边界靠近上端面的位置及右边界的不同位置预制材料缺陷。具体的材料缺陷是节点坐标向试样内部缩进 0.4 mm。计算采用 8 个方案。方案 1, 左边节点与方案编号对应节点设置成缺陷, 依次类推, 直到方案 8, 右上角节点和左下角节点被设置成缺陷, 见图 3。

数值试验的本构模型采用双参数破损率的二元介质本构模型。胶结元采用杨凌原状黄土初始压缩时的弹性模量 E_{i0} 和泊松比 μ_{i0} , 其值在数值模拟剪切过程中不改变, 软弱带摩擦元采用杨凌重塑黄土的弹塑性剑桥模型。

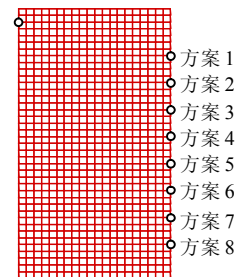


图3 数值试验方案

Fig.3 Project of numerical testing

3.2 数值模拟方法

计算过程分多增量步进行。由于胶结元会逐步破损为摩擦元, 这会引起应力的重分布, 所以在每个增量步中采用迭代的计算方法, 迭代计算的标准是破损率增量 $|\Delta \lambda| \leq 0.002$, 当满足迭代计算要求时, 转入下一个荷载增量步。在整个增量步计算中, 当某个单元的破损率超过 0.95 时, 采用 Mohr-Coulomb 准则进行破坏判断。Mohr-Coulomb 准则判断此单元破坏后, 则设定此单元为完全软弱单元, 其模量改变为 50 kPa, 逐步进行判断分析。

表 1 本构模型参数
Table 1 Parameters of constitutive model

胶结元				摩擦元				
E_{10}	μ_{10}	λ	e_0	c	φ	k	M	ν'
/ kPa				/ kPa	/ (°)			
3 276	0.24	0.086	0.984	24	20.5	0.009 2	0.86	0.333

3.3 破坏准则

为了将土表示为一种合理的工程材料, 现已提出了好几种破坏准则用以描述土的强度。由于土的抗剪强度常用摩擦角和内聚力这两个参量来描述, 本文采用其中应用最为广泛的 Mohr-Coulomb 准则, 它在应力空间中呈现一个不规则的六边形锤体。其主应力形式为

$$\frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \sin \varphi - \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} + c \cos \varphi = 0 \quad (7)$$

式中: σ_1 、 σ_3 为破损率达到 0.95 时摩擦元的最大和最小主应力; φ 为摩擦元的内摩擦角; c 为摩擦元的黏聚力。

4 结果分析和讨论

4.1 剪切带图案的复杂性

剪切带随大主应变 ε_1 演化发展规律显示: 对于方案 1 和方案 2 (见图 4 和图 5), 剪切带最终虽然贯穿了试样, 但剪切带的集中程度比较弱, 均出现共轭剪切带, 但由于受到边界的影响, 一条剪切带的发展都受到了遏制, 使贯通试样的剪切带成为优势剪切带, 得到了充分的发展。

对于方案 3 (图 6), 在试样右边界缺陷附近, 形成了两条共轭剪切带, 一条位于缺陷的上方, 一条位于缺陷的下方。在随后的变形过程中, 位于缺陷上方的剪切带, 受到边界影响, 被遏制, 发展缓慢, 而位于缺陷下方的剪切带, 按其固有方向向试样内部扩展, 形成优势剪切带, 得到了一定程度的发展。优势剪切带在向试样内部延伸时, 即在结构块向结构带转变的过程中, 发生了向周围扩散的趋势, 造成了剪切带宽度变大, 发生区域性破坏。

剪切带启动开始同方案 4 (见图 7) 一样, 方案 5 (见图 8) 缺陷位于试样中间的下部, 随着荷载的增加, 缺陷上方的剪切带迅速与左边缺陷形成的连通 (见图 8(c)), 形成贯通式剪切带。对比方案 1~7, 发现随着缺陷的下移, 剪切带越来越窄, 集中在较为狭窄的范围之内。

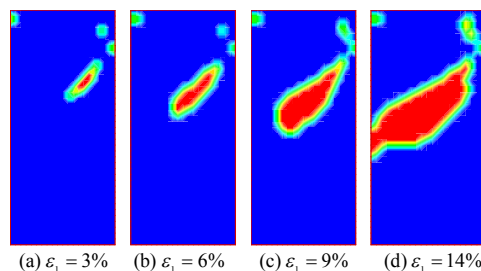


图 4 方案 1 剪切带萌生扩展图

Fig.4 Process of shear band germination and spread of project No.1

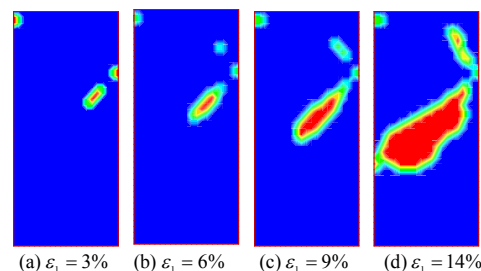


图 5 方案 2 剪切带萌生扩展图

Fig.5 Process of shear band germination and spread of project No.2

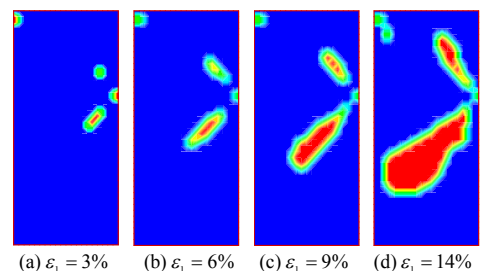


图 6 方案 3 剪切带萌生扩展图

Fig.6 Process of shear band germination and spread of project No.3

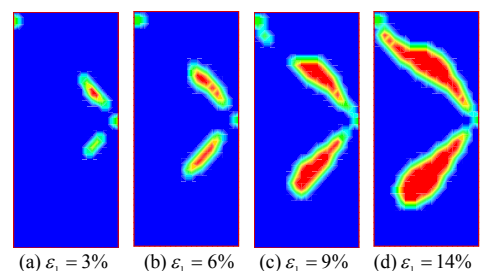


图 7 方案 4 剪切带萌生扩展图

Fig.7 Process of shear band germination and spread of project No.4

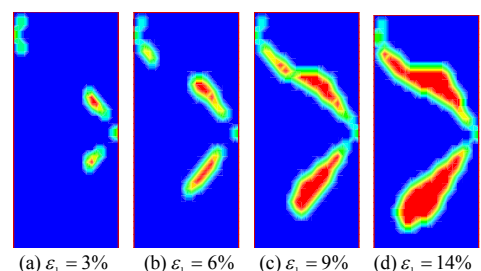


图 8 方案 5 剪切带萌生扩展图

Fig.8 Process of shear band germination and spread of project No.5

方案6(见图9)和方案7(见图10),虽然形成共轭型剪切带,但优势剪切带扩展并迅速与另一处缺陷形成的剪切带连通,造成线性破坏,而位于缺陷下方长度较短的剪切带明显处于劣势,发展缓慢,分析其原因是剪切带有向阻力小的方向快速发展的特点,方案7形成的剪切带与水平面的夹角约为 55° ,符合剪切面与大主应力作用面夹角为 $45^\circ + \varphi/2$ 的土体破坏理论,且方案7形成的剪切带最为狭窄。

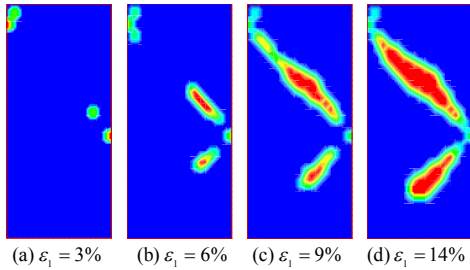


图9 方案6剪切带萌生扩展图

Fig.9 Process of shear band germination and spread of project No.6

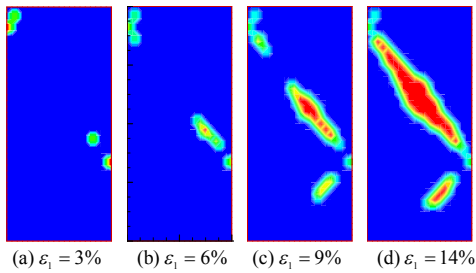


图10 方案7剪切带萌生扩展图

Fig.10 Process of shear band germination and spread of project No.7

方案8(见图11),缺陷靠近模型下端边界,由于受到边界的影响,优势剪切带得到充分发展,随着荷载的增加,剪切带向试样中部发展,并表现出扩散现象,最终和试样顶部缺陷形成的剪切带连接贯通。

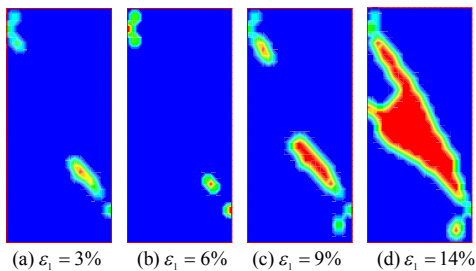


图11 方案8剪切带萌生扩展图

Fig.11 Process of shear band germination and spread of project No.8

综上所述,可以得到以下几点认识:①剪切带的发展起初一般表现出间断性,并非连贯扩展,随着荷载的增加,最终连通贯穿;②剪切带常表现出共轭性和优势发展现象;③土样中不同位置的缺陷所启动剪切带萌生和扩展的形式不同,有的出现向周边扩散的趋势,有的则比较集中。

4.2 全程应力-应变曲线的离散性

比较试验曲线和数值模拟所得到的剪应力($\sigma_1 - \sigma_3$)与大主应变 ε_1 关系曲线(见图12),起始段加荷在50 kPa之内,数值模拟曲线处于试验曲线下方,即75 kPa和175 kPa之间,数值模拟所得曲线在试验曲线上部,而加荷大于175 kPa后,试验曲线位于数值模拟曲线上部,试验曲线缓慢上升,而数值模拟曲线较为平缓,分析其原因有:①结构块的模量是根据不同围压下三轴固结排水试验取平均值得到的,软弱带的本构关系完全引用重塑土剑桥本构模型,将它们组合应用于平面应变试验的数值模拟,存在一定的误差;②体积破损率与面积破损率均在不同围压三轴压缩试验曲线上分析总结得到的,其组合模拟平面应变试验的曲线虽不能完全符合室内试验的结果,但能较好地反映局部化剪切带萌生、扩展的规律。方案4和方案7比其他方案出现分叉早的原因是此两处设定的缺陷易启动剪切带的萌生、扩展。方案4设定的缺陷在模型的中间位置处,上下边界对共轭剪切带扩展影响小,上下剪切带扩展较为同步和均匀,致使分叉现象出现得早。方案7设置缺陷的倾角约为 $45^\circ + \varphi/2$,符合剪切带萌生、扩展的角度,剪切带易于萌生和扩展贯通,故比其他方案分叉出现得早。

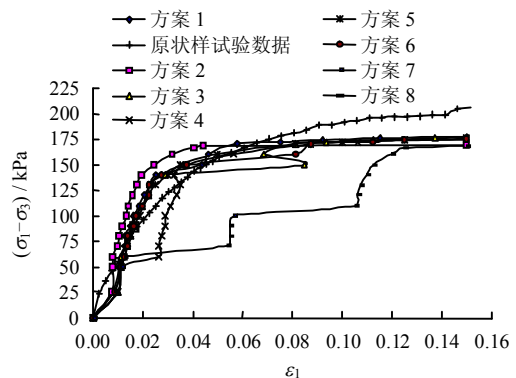


图12 数值试验和室内试验的应力-应变曲线

Fig.12 Stress-strain curves of numerical testing and laboratory testing

由图13方案4和方案7,应力-应变曲线明显与其他方案不同,曲线表现出台阶形式。分析其原因

因是缺陷所处的位置特殊,使土样在不同阶段发生脆性破坏,每次发生大的变形后,又开始进行应力分布的重新调整,当应力积聚到一定程度,再次发生脆性破坏,产生很大的变形,直到试样破坏。但不同方案表现出的规律性是剪切带最终贯通都具有急剧性,当荷载加到接近破坏荷载时,即使很小的荷载增量,就会产生很大的变形,试样倾向于脆性失稳破坏。

图 13 方案 7 的面积破损率和剪应力演化规律显示(见图 14、15),当应变到达 A 点和 B 点这区间时,剪应力的变化并不是很大,而面积破损率的变化非常剧烈,破损率梯度并不明显,说明随着应变的增大,应力在聚集调整;从 B 点到 C 点,剪应力增加,破损率梯度变化明显,局部地方破损率急剧增加;从 C 点到 D 点,剪应力有所增加,面积破损率梯度变化明显,形成贯通趋势,说明大破损率

处已开始形成局部化剪切带。

计算结果表明,缺陷对剪切带形成有很大的影响,它决定剪切带的方向和集中程度,同时缺陷的位置也决定剪切带的形式和发生发展的难易程度。所以,采用缺陷单元方法以激发剪切带的萌生、扩展和再现剪切带的发展过程是合理与成功的。

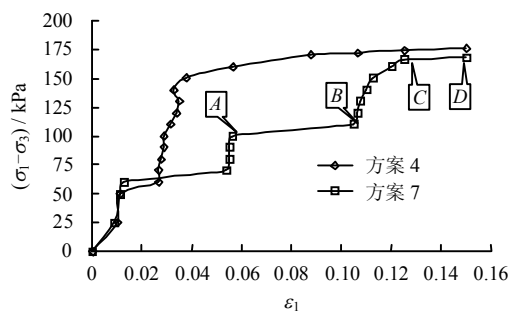


图 13 方案 4 和方案 7 应力-应变的关系曲线
Fig.13 Stress-strain curves of project No.4 and No.7

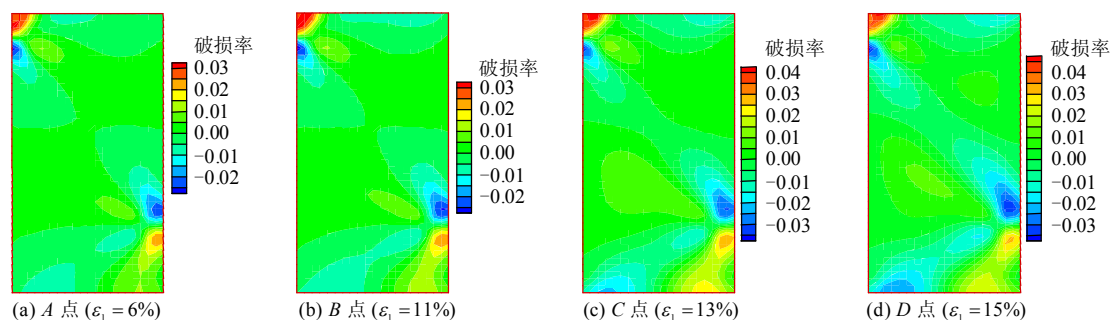


图 14 在不同应变下试样的面积破损率分布图
Fig.14 Distribution of area breakage ratios under different strains

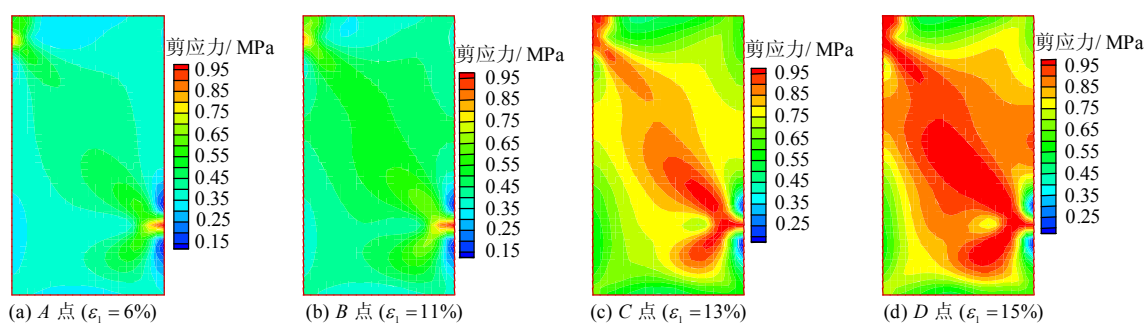


图 15 在不同应变下试样的剪应力分布图
Fig.15 Distribution of shear stresses under different strains

5 结 论

利用结构性土的双参数破损率二元介质本构模型,对平面应变试验在不同的计算方案下对其局部化变形破坏规律进行了较为全面的研究,得出了以下几点结论。

(1) 剪切带萌生、扩展时是不连贯的,表现出

一段一段间隔的破坏区域,随着荷载的增加,最终连接贯通形成连续破坏带,所以说剪切带萌生、扩展时具有间断性的特点。

(2) 土样的损伤能导致剪切带现象的发生,损伤的位置也决定了剪切带的形状和剪切带萌生、扩展的难易程度。

(3) 数值模拟局部化剪切带,缺陷位置的设定

对分叉出现有很大的影响,当边界条件影响较小时,剪切带易于萌生和扩展。当缺陷位置接近 $45^\circ + \varphi/2$ 时,剪切带易于萌生,形成的剪切带也最为狭窄,其强度也最低。

(4) 二元介质本构模型结合常规有限元,采用设置缺陷单元的方法,可以模拟局部化剪切带萌生、扩展的过程,研究其启动、发展的规律。

参考文献

- [1] 蒋明镜, 沈珠江. 结构性黏土剪切带的微观分析[J]. 岩土工程学报, 1998, 20(2): 102—108.
JIANG Ming-jing, SHEN Zhu-jiang. Microscopic analysis of shear band in structured clay[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1998, 20(2): 102—108.
- [2] 徐松林, 吴文. 岩土材料局部化变形分岔分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(20): 3430—3438.
XU Song-lin, WU Wen. Bifurcation analysis of deformation localization of geomaterial[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(20): 3430—3438.
- [3] 钱建固, 吕玺琳, 黄茂松. 平面应变状态下土体的软化特性与本构模拟[J]. 岩土力学, 2009, 30(3): 617—622.
QIAN Jian-gu, LÜ Xi-lin, HUANG Mao-song. Softening characteristics of soils and constitutive modeling under plane strain condition[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(3): 617—622.
- [4] 甄文战, 孙德安, 段博. 不同应力路径下超固结黏土试样变形局部化分析[J]. 岩土力学, 2011, 32(1): 293—298.
ZHEN Wen-zhan, SUN De-an, DUAN Bo. Analysis of strain localization in overconsolidated clay specimens along different stress paths[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 32(1): 293—298.
- [5] 孙红, 赵锡宏. 软土的损伤对剪切带形成的影响[J]. 同济大学学报, 2001, 29(3): 278—282.
SUN Hong, ZHAO Xi-hong. Influence on shear band formation by damage of soft soil[J]. **Journal of Tongji University**, 2001, 29(3): 278—282.
- [6] 蔡正银. 砂土的渐进破坏及其数值模拟[J]. 岩土力学, 2003, 29(3): 580—585.
CAI Zheng-yin. Progressive failure of sand and its numerical simulation[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2003, 29(3): 580—585.
- [7] 齐德瑄, 张义同, 任述光. 平面应变状态下砂土剪切带分析[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(7): 1014—1019.
QI De-xuan, ZHANG Yi-tong, REN Shu-guang. Analysis of shear band in sand under plane strain state[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2009, 31(7): 1014—1019.
- [8] 李福林, 彭芳乐, 雷亮, 等. 平面应变条件下砂土局部化剪切带的有限元模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(4): 850—857.
LI Fu-lin, PENG Fang-le, LEI Liang, et al. Finite element simulation of strain localization on a shear band of sand under plane strain condition[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2010, 29(4): 850—857.
- [9] 董建国, 李蓓. 黏性土剪切带的形成与其屈服的内在联系的探索[J]. 岩土力学, 2007, 28(5): 580—585.
DONG Jian-guo, LI Bei. Study of internal relations between formation of shear bands and its yield in clay[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2007, 28(5): 580—585.
- [10] 李蓓, 赵锡宏, 董建国. 上海黏性土剪切带倾角的试验研究[J]. 岩土力学, 2002, 23(4): 423—427.
LI Bei, ZHAO Xi-hong, DONG Jian-guo. Experimental study of shear band inclination in Shanghai clay[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2002, 23(4): 423—427.
- [11] 李元海, 靖洪文, 朱合华, 等. 基于图像相关分析的土体剪切带识别方法[J]. 岩土力学, 2007, 28(3): 522—526.
LI Yuan-hai, JING Hong-wen, ZHU He-hua, et al. A technique of identifying shear band accurately in granular soil using image correlation analysis[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2007, 28(3): 522—526.
- [12] SUN D A, HUANG W X, YAO Y P. An experimental study of failure and softening in sand under three-dimensional stress condition[J]. **Granular Matter**, 2008, 10(3): 187—195.
- [13] WANG Q, LADE P V. Shear banding in true triaxial tests and its effect on failure in sand[J]. **Journal of Engineering Mechanics**, 2001, 127(8): 754—761.
- [14] 王助贫, 邵龙潭, 孙益振. 基于数字图像测量技术的粉煤灰三轴试样剪切带研究[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(9): 1163—1167.
WANG Zhu-pin, SHAO Long-tan, SUN Yi-zhen. Study on shear band of fly ash triaxial specimen based on digital image processing technique[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2006, 28(9): 1163—1167.
- [15] 邵龙潭, 孙益振, 王助贫, 等. 数字图像测量技术在土工三轴试验中的应用研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(1): 29—34.
SHAO Long-tan, SUN Yi-zhen, WANG Zhu-pin, et al. Application of digital image processing technique to triaxial test in soil mechanics[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 27(1): 29—34.
- [16] ODA M, KAZAMA H. Microstructure of shear bands and

- its relation to the mechanisms of dilatancy and failure of dense granular soils[J]. **Geotechnique**, 1998, 48(4): 465—481.
- [17] 陈胜宏, 秦卫星, 徐青. 应变局部化带追踪模拟的复合单元方法与应用[J]. **岩石力学与工程学报**, 2007, 26(6): 1116—1122.
- CHEN Sheng-hong, QIN Wei-xing, XU Qing. Composite element method and application of trace simulation for strain localization bands[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2007, 26(6): 1116—1122.
- [18] 喻蓓临, 孙逊, 于玉贞, 等. 结构性土中剪切带扩展的模型试验研究[J]. **清华大学学报(自然科学版)**, 2010, 50(3): 367—371.
- YU Jia-lin, SUN Xun, YU Yu-zhen, et al. Experimental study of the evolution of shear bands in structured soil[J]. **Journal of Tsinghua University (Science and Technology)**, 2010, 50(3): 367—371.
- [19] 黄茂松, 贾苍琴, 钱建固. 岩土材料应变局部化的有限元分析方法[J]. **计算力学学报**, 2007, 24(4): 465—471.
- HUANG Mao-song, JIA Cang-qin, QIAN Jian-gu. Strain localization problems in geomaterials using finite elements[J]. **Chinese Journal of Computational Mechanics**, 2007, 24(4): 465—471.
- [20] 蒋明镜, 王富周, 朱合华. 单粒组密砂剪切带的直剪试验离散元数值分析[J]. **岩土力学**, 2010, 31(1): 253—257, 298.
- JIANG Ming-jing, WANG Fu-zhou, ZHU He-hua. Shear band formation in ideal dense sand in direct shear test by discrete element analysis[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(1): 253—257, 298.
- [21] 沈珠江. 岩土破损力学: 理想脆弹塑性模型[J]. **岩土工程学报**, 2003, 25(3): 253—257.
- SHEN Zhu-jiang. Breakage mechanics for geological materials: an ideal brittle-elasto-plastic model[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2003, 25(3): 253—257.
- [22] 沈珠江, 刘恩龙, 陈铁林. 岩土二元介质模型的一般应力-应变关系[J]. **岩土工程学报**, 2005, 27(5): 489—494.
- SHEN Zhu-jiang, LIU En-long, CHEN Tie-lin. Generalized stress-strain relationship of binary medium model for geological materials[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2005, 27(5): 489—494.
- [23] 李宏儒. 结构性黄土破损变形发展演化特性的研究[博士学位论文D]. 西安: 西安理工大学, 2009.

《岩土力学》2012年第6期被EI收录论文(47篇, 收录率100%)(1)

序号	论文题名	作者	页码
1	三轴应力作用下岩盐溶蚀特性试验研究	汤艳春, 房敬年, 周 辉	1601—1607
2	碱渣改良膨胀土室内试验研究	孙树林, 郑青海, 唐 俊, 等	1608—1612
3	周期荷载作用下盐岩声发射特征试验研究	任 松, 白月明, 姜德义, 等	1613—1618
4	水泥土各向异性变形特性研究	宋新江, 徐海波, 王雷, 等	1619—1624
5	K_0 固结条件下粗粒土变形及强度特性研究	褚福永, 朱俊高, 王 平, 等	1625—1630
6	压实度和含水率对压实黏性土动态力学性能的影响试验研究	刘俊新, 陈忠富, 徐伟芳, 等	1631—1639
7	岩石节理倾角和间距对隧道掘进机破岩特性影响的试验研究	邹 飞, 李海波, 周青春, 等	1640—1646
8	含充填节理岩体相似材料试件单轴压缩试验及断裂损伤研究	张 波, 李术才, 张敦福, 等	1647—1652
9	高黏性铝土矿放矿流动性试验与微观力学研究	张春阳, 曹 平, 范 祥, 等	1653—1659
10	高温冻土松弛特性试验研究	王松鹤, 齐吉琳	1660—1666
11	水平-竖向加筋饱和砂土动弹性模量试验研究	邱成春, 张孟喜	1667—1672
12	混合型缓冲回填材料非饱和和水分扩散试验研究	张 明, 张虎元, 贾灵艳	1673—1678
13	单轴压缩非贯通节理岩石尖端塑性区及弹塑性断裂模型研究	袁小平, 刘红岩, 王志乔	1679—1688
14	地应力与岩石弹性模量关系试验研究	秦向辉, 谭成轩, 孙进忠, 等	1689—1695
15	土钉加固黏性土坡加载的离心模型试验研究	曹 洁, 张 嘎, 王丽萍	1696—1702
16	高地应力破碎软岩巷道底臃特性及综合控制对策研究	刘泉声, 肖 虎, 卢兴利, 等	1703—1710
17	山区高填方地基蠕变沉降特性及简化计算方法探讨	宋二祥, 曹光栩	1711—1718
18	谷竹高速公路原状片岩抗剪强度的水敏性研究	刘 建, 李建朋	1719—1723
19	基于最小二乘法的边坡稳定性分析	贺建清, 刘秀军	1724—1729
20	加锚岩体流变特性及锚固控制机制分析	赵同彬, 谭云亮, 刘姗姗, 等	1730—1734
21	双圆盾构施工引起邻近地下管线附加荷载的分析	魏 纲, 洪 杰, 魏新江	1735—1741
22	超深孔一次成井微差爆破技术研究	李廷春, 刘洪强, 王超	1742—1746
23	海堤地基固结系数反演与工后沉降变形模型预测	秦植海, 秦 鹏	1747—1753
24	微型抗滑桩土拱效应空间特征的细观力学分析	姜春林, 李 晋	1754—1760
25	隧道水平冻结施工引起地表冻胀的历时预测模型	蔡海兵, 彭立敏, 郑腾龙	1761—1768
26	郑西高速铁路豫西段黄土现场浸水自重湿陷特征研究	武小鹏, 熊治文, 王小军, 等	1769—1773

(未完, 见第2844页)