

DOI: 10.11779/CJGE201606004

# 单轴压缩湿土样最大剪切应变场数字图像 相关方法结果的统计分析

王学滨<sup>1, 2, 3</sup>, 张楠<sup>2</sup>, 潘一山<sup>2</sup>, 杜亚志<sup>2</sup>

(1. 中国矿业大学(北京)力学与建筑工程学院, 北京 100083; 2. 辽宁工程技术大学力学与工程学院, 辽宁 阜新 123000;  
3. 辽宁工程技术大学计算力学研究所, 辽宁 阜新 123000)

**摘要:** 研究了单轴压缩湿土样沿剪切带方向的最大剪切应变的均值和标准差以及剪切局部化区域尺寸的演变规律。为了深入揭示土样剪切带萌生的过程, 根据纵向应变较高时清晰剪切带所处位置在土样上布置测线, 对由数字图像相关方法获得的结果进行双三次样条插值, 从而获得测线上光滑性较好的最大剪切应变分布。研究发现, 随着纵向应变的增加, 沿剪切带方向的最大剪切应变由低值多峰向高值少峰转变。测线上最大剪切应变发生突增的点、局部高值点及低值点均有可能发展成为主峰。测线上最大剪切应变的均值和标准差随纵向应变的演变规律在总体上均呈上凹形, 但当纵向应变较低时, 二者均呈线性。以上述两种统计量线性规律丧失所对应的平均最大剪切应变作为剪切带萌生的条件。随着纵向应变的增加, 土样中发生剪切局部化的区域越来越大。欲达到相同的剪切局部化区域尺寸, 含水率高的土样所要求的纵向应变较高。当纵向应变较高时, 含水率高的土样的剪切局部化区域尺寸比含水率低的土样要大, 这与其塑性变形阶段较长有关。

**关键词:** 湿土样; 剪切带; 最大剪切应变; 统计; 剪切局部化

中图分类号: TU454

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2016)06-0996-08

**作者简介:** 王学滨(1975-), 男, 黑龙江双鸭山人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事岩土材料的变形、破坏及稳定性研究。E-mail: wxbbb@263.net。

## Statistical analyses of maximum shear strain fields for wet soil specimens in uniaxial compression using digital image correlation method

WANG Xue-bin<sup>1, 2, 3</sup>, ZHANG Nan<sup>2</sup>, PAN Yi-shan<sup>2</sup>, DU Ya-zhi<sup>2</sup>

(1. School of Mechanics and Architecture Engineering, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China; 2. College of Mechanics and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China; 3. Institute of Computational Mechanics, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China)

**Abstract:** The evolution of the mean and standard deviations of the maximum shear strains for wet soil specimens in uniaxial compression and the size of the shear localization region are studied. To explore the occurrence and development of shear bands, some monitored lines are arranged in the specimens according to the positions of apparent shear bands at higher longitudinal strains. The maximum shear strains at these lines are obtained using a bicubic spline interpolation function with good smoothness from the results based on the digital image correlation method. It is found that the distribution of the maximum shear strains along shear bands transits from several peaks with lower values to a few main peaks with higher values with the increase of the longitudinal strain. These main peaks originate from the positions where the maximum shear strains increase rapidly and from those with local higher or lower values. Generally, the mean and standard deviations of the maximum shear strains at monitored lines are convex upwards with the increase of the longitudinal strain. However, at lower longitudinal strains, the two statistical quantities are linear. The mean of the maximum shear strain corresponding to the end of the linear stage of statistical quantities is regarded as the occurrence of shear bands. The size of the shear localization region increases with the increase of the longitudinal strain. For the same size of the shear localization region, the specimens with higher water contents require higher longitudinal strains. At higher longitudinal strains, the size of the shear localization region for

基金项目: 国家自然科学基金项目(51374122); 高等学校博士点专项  
科研基金项目(20132121110006); 辽宁省科学事业公益研究基金项目  
(GY2014-C-008)

收稿日期: 2015-05-25



the specimens with higher water contents is larger than that with lower water contents, which is related to its longer stage of plastic deformation.

**Key words:** wet soil specimen; shear band; maximum shear strain; statistics; shear localization

## 0 引言

在岩土材料出现宏观裂纹之前, 通常都能观察到剪切应变高度集中的带状区域, 该区域称为剪切带, 这种现象称为剪切局部化。剪切带引导着宏观裂纹的扩展, 是材料破坏的重要前兆之一。由于剪切带问题研究的重要理论及实际意义, 研究人员的研究兴趣从未衰减<sup>[1-7]</sup>。

目前, 剪切带问题试验研究的主要手段包括: 数字图像相关 (digital image correlation, DIC) 方法、声发射技术、热红外技术及 CT 技术等。和其他研究手段相比, DIC 方法的优点在于便于实时观测, 设备低廉, 精度高, 在岩土材料破坏问题研究中发挥了重要的作用<sup>[8-13]</sup>。目前, 基于 DIC 方法的岩土材料剪切带问题研究, 多是凭借肉眼对获得的各种位移场和应变场的分布及发展规律进行粗略、定性的分析, 研究手段单一, 研究视野狭窄, 分析难度较高, 定量结果较少。通过肉眼观察剪切带数量的多寡, 剪切带宽度和倾角的变化, 剪切带内外应变的变化仅能粗略地考察岩土材料的破坏、失稳及前兆。目前, 对于岩土材料破坏过程中各种场的深入统计、定量分析的研究还不多见, 对于剪切局部化区域尺寸的变化规律还未见报道, 该问题涉及地质灾害发生的规模和区域。

为了获得更好的光滑性数据, 以 DIC 方法获得的单轴压缩湿土样 (含水率为 13.6%~17.2%, 加载速率为 5~8 mm·min<sup>-1</sup>) 的最大剪切应变场为基础, 本文利用双三次样条函数对其进行插值, 获得了土样中某些位置 (剪切带位置及其出现前) 的最大剪切应变的均值和标准差两种统计量的演变规律, 以其线性演变规律丧失的时刻所对应的平均最大剪切应变作为剪切带萌生的阈值。以上述阈值作为依据, 计算土样中超过此阈值的区域的尺寸, 研究其随土样纵向应变的演变规律。为了对剪切带细节刻画得更为细致, 本文图像的像素数目是文献<sup>[13]</sup>的 4 倍。

## 1 基本思路

为了深刻揭示剪切带的萌生及发展规律, 有必要对最大剪切应变  $\gamma_{\max}$  场进行统计和分析。采用如下研究思路: 首先, 在一些较清晰的剪切带上布置测线, 并利用双三次样条插值方法获得这些测线上的  $\gamma_{\max}$ ; 然后, 利用统计方法对这些测线上的  $\gamma_{\max}$  进行统计, 确定统计量偏离线性的时刻所对应的平均最大剪应变阈值, 以此作为剪切带萌生的条件; 最后, 以此为依

据, 对整个土样的  $\gamma_{\max}$  场进行统计, 以确定土样中出现剪切局部化的区域的尺寸的变化规律。

新测线的位置根据土样纵向应变  $\varepsilon_a$  较高时且微裂纹刚出现时的  $\gamma_{\max}$  场中一些较清晰剪切带所处位置确定。一旦这些新测线的位置确定, 即使在这些剪切带出现之前, 也可以方便地获取这些测线上的  $\gamma_{\max}$ 。

## 2 最大剪切应变 $\gamma_{\max}$ 场的插值和统计

### 2.1 最大剪应变 $\gamma_{\max}$ 场的插值方法

在 DIC 方法中, 为了获得变形过程中材料表面的位移场和应变场, 通常需要在材料表面布置一些水平成行、垂直成列 ( $m$  行  $n$  列) 的测点。

采用先粗后细的相关搜索方法<sup>[12]</sup>获得测点的位移场。通过对位移场进行中心差分获得 3 种应变场: 水平线应变  $\varepsilon_x$  场、垂直线应变  $\varepsilon_y$  场和剪应变  $\gamma_{xy}$  场。由此可以计算出材料表面的最大剪切应变  $\gamma_{\max}$  场:

$$\gamma_{\max} = \sqrt{(\varepsilon_x - \varepsilon_y)^2 + \gamma_{xy}^2} \quad (1)$$

应当指出, 以上获得的  $\gamma_{\max}$  场是离散的, 即仅在  $m$  行  $n$  列测点处有值。欲获得任一关注位置的  $\gamma_{\max}$ , 需对  $\gamma_{\max}$  场进行插值。选取光滑性较高的双三次样条函数作为插值函数。插值的目的不仅在于获取特定位置的  $\gamma_{\max}$ , 还有利于对  $\gamma_{\max}$  场进行统计。

### 2.2 最大剪应变 $\gamma_{\max}$ 场的两种统计方法

采用两种统计方法对测线上的  $\gamma_{\max}$  进行统计:

(1) 平均值法。通过对测线上所有测点 (个数为  $N$ ) 的  $\gamma_{\max}$  取平均, 获得  $\gamma_{\max}$  的平均值:

$$\mu = \frac{\sum_{i=1}^N (\gamma_{\max})_i}{N} \quad (2)$$

(2) 标准差法。计算测线上所有测点的  $\gamma_{\max}$  的标准差:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N [(\gamma_{\max})_i - \mu]^2}{N-1}} \quad (3)$$

经过双三次样条插值, 离散的  $\gamma_{\max}$  场将变得光滑连续, 信息丰富, 这有利于对达到剪切带萌生条件的区域的尺寸进行统计。否则, 可能会由于  $m$  行  $n$  列数据点过少而导致较大的统计误差。

## 3 试验过程及结果分析

### 3.1 试验步骤及土样基本信息

试验用土取自阜新市细河区某建筑工地，液限为 37.7%，塑限为 23.5%，为低液限黏土。土样的制备过程与文献[13]相同，未加入黏合剂。利用试验机对 30 余个土样进行无侧限单轴压缩试验。在试验过程中，用数码相机拍摄土样中一个喷涂了散斑的表面的图像。试验结束后，利用 DIC 方法程序<sup>[12]</sup>，对所拍摄的部分图像进行计算。计算前，在土样表面布置 4272(89 行 48 列)个测点，子区尺寸为 41 像素×41 像素，测点间距为 20 像素。限于篇幅，本文仅分析了#10、#19 及#24 土样(图 1)直至微裂纹出现的计算结果。图 1 分别给出了各土样在加载初期及直至微裂纹出现的散斑图。土样的基本参数、加载时间及加载速率见表 1。取土颗粒相对密度  $G_s=2.75$ ，通过计算可得#10、#19 及#24 土样的孔隙比分别为 0.66，0.52 及 0.67，饱和度分别为 71.8%，83.2%及 85.4%。3 个土样高度方向的像素数目约为 2000。本文的土样与文献[13]中#7，#8，#22 土样属同一批次。尽管这些土样的尺寸相差不大，但由于本文采用的图像的像素数目是文献[13]的 4 倍，所以，对剪切带细节的刻画更为细致，更有利于结果的统计分析。

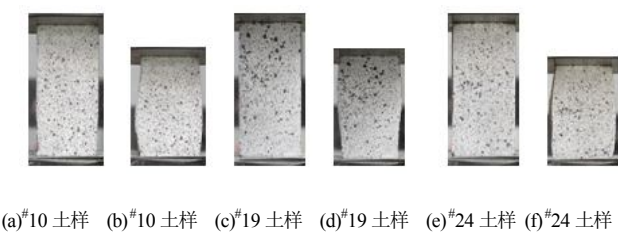


图 1 土样在加载初期及微裂纹出现时的图像

Fig. 1 Images at initial loading stage and corresponding to occurrence of microcracks for soil specimens

表 1 3 个砂土试样的基本信息

Table 1 Basic information for three sandy soil specimens

编号	含水率/%	加载总时间/s	加载速度/(mm·min <sup>-1</sup> )	高度×宽度×厚度/(cm×cm×cm)	湿密度/(10 <sup>3</sup> ·kg·m <sup>-3</sup> )
#10	14.7	309	5	9.0×5.1×3.9	1.94
#19	13.6	269	5	9.0×5.0×3.8	2.09
#24	17.2	235	8	9.1×5.0×3.8	1.99

3.2 图片说明

图 2~4 分别给出了#10、#19 及#24 土样 6 个不同时刻的最大剪应变  $\gamma_{\max}$  场的分布规律，6 个时刻所对应的纵向应变  $\varepsilon_a$  不同，图中土样下方和左方的数字是插值之后的数据点数。

图 5~7 分别给出了#10、#19 及#24 土样中一些测线上  $\gamma_{\max}$  的分布及演变规律。图 8~10 分别给出了 3 个土样中一些测线上  $\gamma_{\max}$  的均值  $\mu$  及标准差  $\sigma$  的变

化规律。图 11 给出了 3 个土样的  $\gamma_{\max}$  场中超过剪切带萌生条件的区域占整个区域的百分比的演变规律。图 12 给出了 3 个土样的压应力  $\sigma_a$  - 纵向应变  $\varepsilon_a$  曲线。

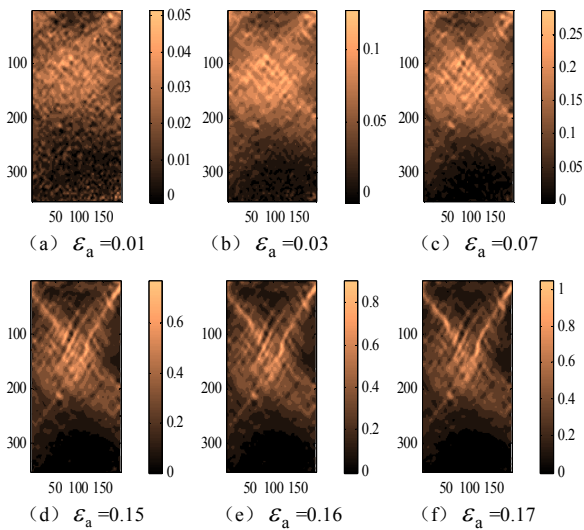


图 2 #10 土样不同纵向应变  $\varepsilon_a$  时最大剪切应变  $\gamma_{\max}$  分布规律  
Fig. 2 Distribution of maximum shear strains ( $\gamma_{\max}$ ) for different longitudinal strains ( $\varepsilon_a$ ) of soil specimen No.10

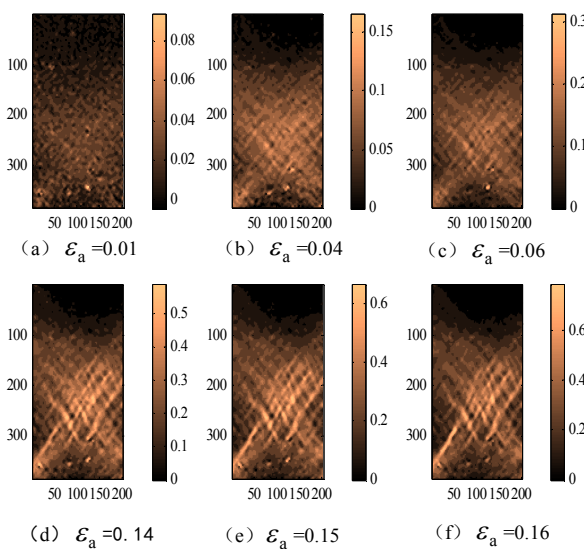
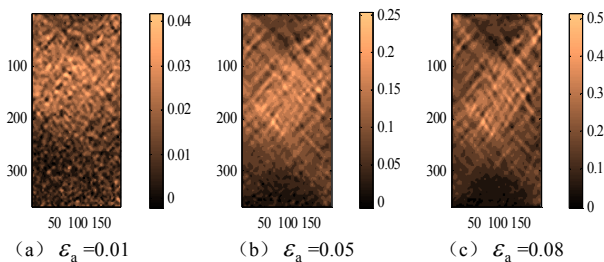


图 3 #19 土样不同纵向应变  $\varepsilon_a$  时最大剪切应变  $\gamma_{\max}$  分布规律  
Fig. 3 Distribution of maximum shear strains ( $\gamma_{\max}$ ) for different longitudinal strains ( $\varepsilon_a$ ) of soil specimen No.19



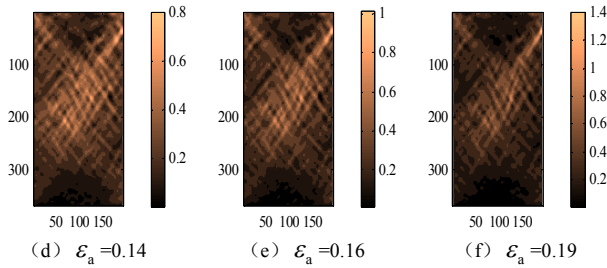
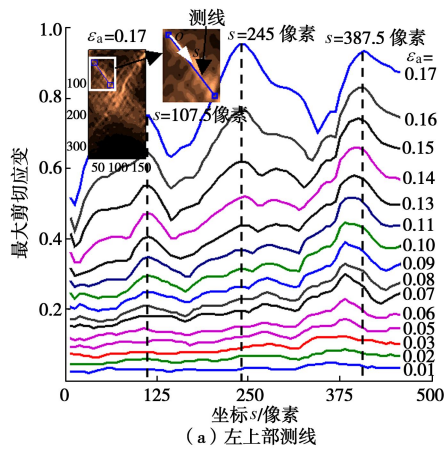
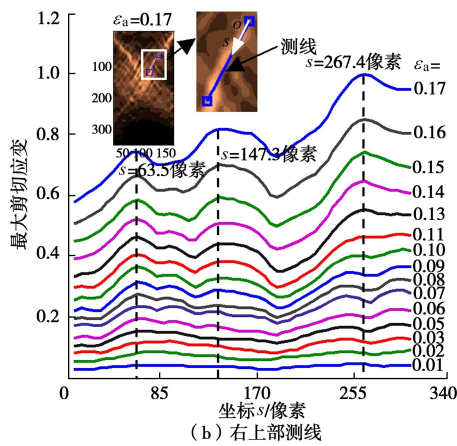


图4 #24土样不同纵向应变 $\varepsilon_a$ 时最大剪切应变 $\gamma_{\max}$ 分布规律

Fig. 4 Distribution of maximum shear strains ( $\gamma_{\max}$ ) for different longitudinal strains ( $\varepsilon_a$ ) of soil specimen No. 24



(a) 左上部测线



(b) 右上部测线

图5 #10土样两条剪切带发展过程中测线上 $\gamma_{\max}$ 的演变规律

Fig. 5 Evolution of maximum shear strains ( $\gamma_{\max}$ ) at monitored lines during development of two shear bands of soil specimen No. 10

### 3.3 最大剪切应变 $\gamma_{\max}$ 场及宏观应力-应变曲线

3个土样的 $\sigma_a - \varepsilon_a$ 曲线(图12)大致经历了两个阶段:近似线性阶段和硬化阶段。在后一阶段中,应力以小幅振荡方式上升。#19土样的 $\sigma_a - \varepsilon_a$ 曲线最陡,这与其含水率最低有关;#24土样的 $\sigma_a - \varepsilon_a$ 曲线最缓,这与其含水率最高有关。

下面,以#10土样为例,阐明 $\gamma_{\max}$ 的分布及演变规律:①在近似线性阶段, $\gamma_{\max}$ 的高值区呈斑点状或

块状,高、低值区的 $\gamma_{\max}$ 相差不大(图2(a));②在硬化阶段, $\gamma_{\max}$ 的分布呈网状,随着 $\varepsilon_a$ 的增加,剪切带的网状格局越来越清晰(图2(b)~(f)),剪切带有变陡的趋势,剪切带宽度有变窄的趋势,剪切带之间的差异变大:由 $\varepsilon_a$ 较低时多个条带的 $\gamma_{\max}$ 相差不大,变为 $\varepsilon_a$ 较高时仅个别条带的 $\gamma_{\max}$ 非常高。

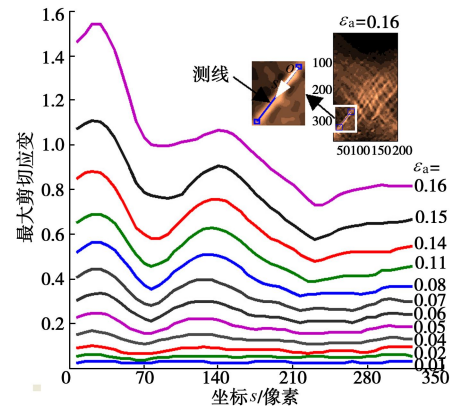


图6 #19土样1条剪切带发展过程中测线上 $\gamma_{\max}$ 的演变规律

Fig. 6 Evolution of maximum shear strains ( $\gamma_{\max}$ ) at monitored line during development of one shear band of soil specimen No. 19

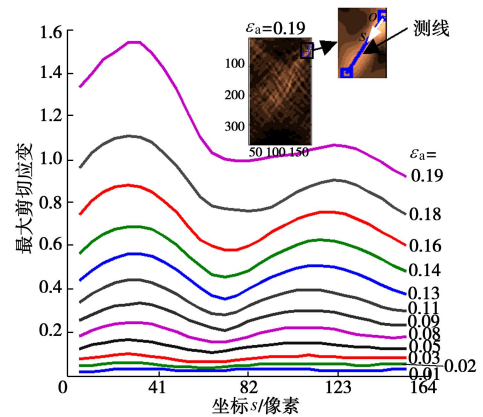
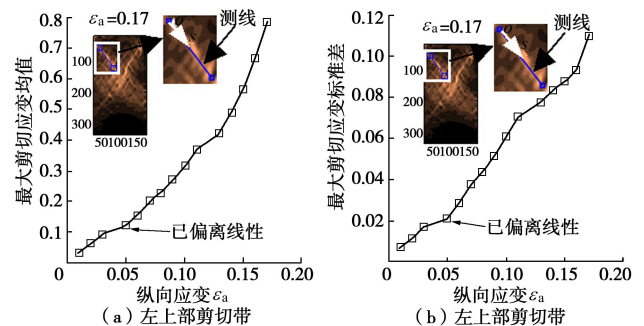


图7 #24土样1条剪切带发展过程中测线上 $\gamma_{\max}$ 的演变规律

Fig. 7 Evolution of maximum shear strains ( $\gamma_{\max}$ ) at monitored line during development of one shear band of soil specimen No. 24



(a) 左上部剪切带

(b) 左上部剪切带



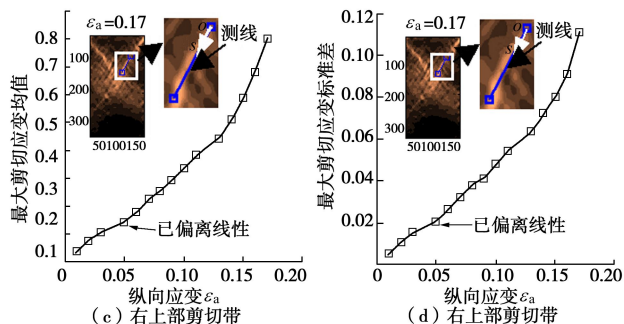


图8 #10土样两条剪切带发展过程中测线上最大剪切应变 $\gamma_{\max}$ 的均值 $\mu$ 及标准差 $\sigma$ 的演化规律

Fig. 8 Evolution of mean ( $\mu$ ) and standard deviation ( $\sigma$ ) of maximum shear strains ( $\gamma_{\max}$ ) at monitored lines during development of two shear bands of soil specimen No. 10

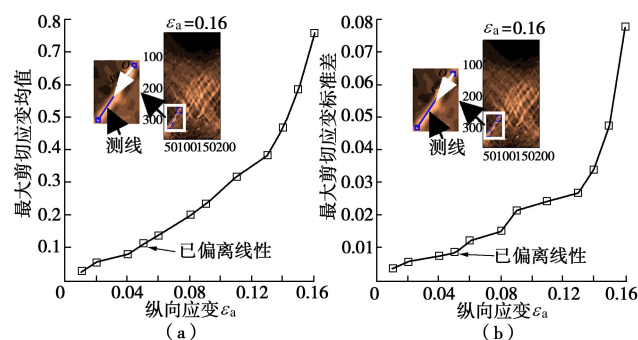


图9 #19土样1条剪切带发展过程中测线上最大剪切应变 $\gamma_{\max}$ 的均值 $\mu$ 及标准差 $\sigma$ 的演化规律

Fig. 9 Evolution of mean ( $\mu$ ) and standard deviation ( $\sigma$ ) of maximum shear strains ( $\gamma_{\max}$ ) at monitored line during development of one shear band of soil specimen No. 19

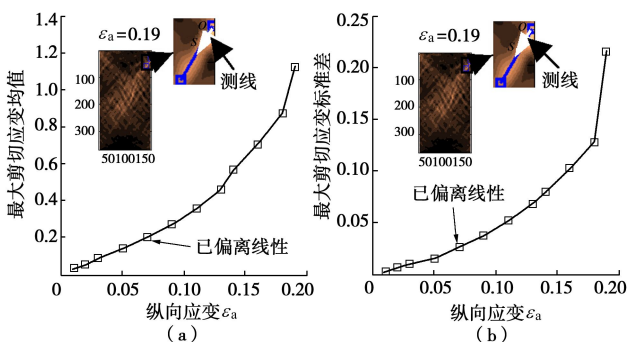


图10 #24土样1条剪切带发展过程中测线上最大剪切应变 $\gamma_{\max}$ 的均值 $\mu$ 及标准差 $\sigma$ 的演化规律

Fig. 10 Evolution of mean ( $\mu$ ) and standard deviation ( $\sigma$ ) of maximum shear strains ( $\gamma_{\max}$ ) at monitored line during development of one shear band of soil specimen No. 24

应当指出, #10土样的剪切带主要集中在土样的中上部, 而#19和#24土样的剪切带分别位于中下部和整个土样。

### 3.4 测线上 $\gamma_{\max}$ 的分布及演变规律

由图2(f)可以发现, 对于#10土样, 当 $\varepsilon_a=0.17$ 时, 清晰的剪切带呈X型。根据清晰剪切带所处位置

布置测线。为了不失一般性, 在#10土样左上部和右上部两条清晰剪切带上分别布置测线, 获得这些测线上 $\gamma_{\max}$ 的分布及演变规律(图5)。对于#19土样, 根据 $\varepsilon_a=0.16$ 时土样左下部1条清晰剪切带所处位置布置测线(图6)。对于#24土样, 根据 $\varepsilon_a=0.19$ 时土样右上部1条清晰剪切带所处位置布置测线(图7)。上述测线的长度分别为450, 306, 322和153像素。坐标原点 $o$ 布置在测线的上端, 坐标用 $s$ 表示, 单位为像素, 本文中1像素约为0.045 mm。

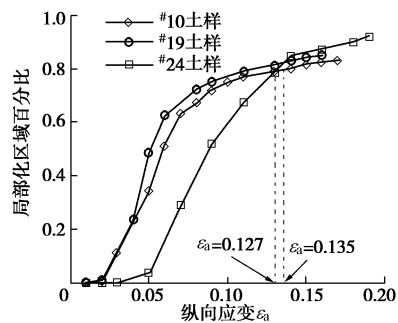


图11 3个土样的剪切局部化区域百分比的演变规律

Fig. 11 Evolution of percentage of shear localization region of three sandy soil specimens

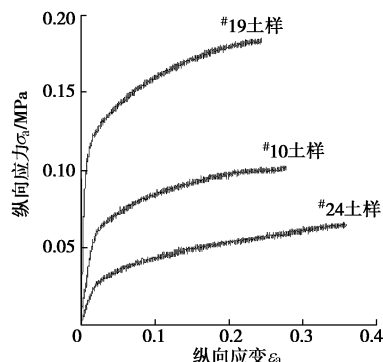


图12 3个土样的压应力 $\sigma_a$ -纵向应变 $\varepsilon_a$ 曲线

Fig. 12 Stress ( $\sigma_a$ )-strains ( $\varepsilon_a$ ) curves of three soil specimens

由图5(a)可以发现:

(1)随着 $\varepsilon_a$ 的增加, #10土样左上部测线上的 $\gamma_{\max}$ 由均匀向不均匀分布转变, 且各处 $\gamma_{\max}$ 均不断增加, 这与文献[13]发现的现象类似。测线上 $\gamma_{\max}$ 的不均匀分布可认为来源于两个方面: ①材料的非均质性及相互作用, 例如, 材质相对软或缺陷多的位置,  $\gamma_{\max}$ 高; ②其余剪切带的影响, 通常, 剪切带交叉位置的 $\gamma_{\max}$ 高。

(2)当 $\varepsilon_a=0.17$ 时(微裂纹刚出现),  $\gamma_{\max}$ 的分布呈现3个明显的主峰。下面介绍其发展过程。当 $\varepsilon_a \leq 0.03$ 时, 测线上各处的 $\gamma_{\max}$ 相差不大, 没有峰值出现。当 $\varepsilon_a=0.05$ 时,  $s=377.5$ 像素处出现全局峰值。此后, 随着 $\varepsilon_a$ 的增加, 此处 $\gamma_{\max}$ 快速增加, 一直处于全局峰值, 直到 $\varepsilon_a=0.11$ 时。当 $\varepsilon_a>0.11$ 时, 全局峰

值从  $s=377.5$  像素处逐渐转移至  $s=387.5$  像素处,最终发展成由左至右第3个主峰。和由左至右的第3个主峰相比,第1,2个主峰萌生较晚。第1个主峰萌生于  $\varepsilon_a=0.08$  时且  $s=107.5$  像素处。此后,随着  $\varepsilon_a$  的增加,该位置的  $\gamma_{\max}$  快速增加,最终发展成第1个主峰。第2个主峰萌生于  $\varepsilon_a=0.13$  时且  $s=245$  像素处。

第2个主峰的萌生过程富有戏剧性。当  $\varepsilon_a < 0.13$  时,与测线上其它位置的  $\gamma_{\max}$  相比,  $s=245$  像素处的  $\gamma_{\max}$  并不高,曾一度低于其右方  $s=275$  像素处的  $\gamma_{\max}$ 。当  $\varepsilon_a \geq 0.13$  之后,  $s=245$  像素处的  $\gamma_{\max}$  才高于其右方  $s=275$  像素处的  $\gamma_{\max}$ ,最后发展成为主峰之一。

由图5(b)可以发现, #10 土样右上部测线上  $\gamma_{\max}$  的分布及演变规律与左上部的类似。当  $\varepsilon_a = 0.17$  时(微裂纹刚出现),  $\gamma_{\max}$  的分布也呈现3个明显的主峰。由左至右3个主峰分别在  $\varepsilon_a = 0.05$  时且  $s=63.5$  像素处、 $\varepsilon_a = 0.10$  时且  $s=147.3$  像素处及  $\varepsilon_a = 0.13$  时且  $s=267.4$  像素处萌生。由左至右的第3个主峰的萌生过程较为特殊。随着  $\varepsilon_a$  的增加,在  $\varepsilon_a < 0.11$  时且  $s=267.4$  像素处及其附近测点的  $\gamma_{\max}$  一度处于低值。当  $\varepsilon_a \geq 0.13$  之后,  $s=267.4$  像素处的  $\gamma_{\max}$  才脱颖而出,最终发展成较为明显的主峰之一。

由图6,7可以发现,随着  $\varepsilon_a$  的增加, #19 土样左下部和 #24 土样右上部测线上  $\gamma_{\max}$  的分布及演变规律与 #10 土样的基本类似,此处不再赘述。不同的是,当  $\varepsilon_a$  较高时,与 #10 土样的  $\gamma_{\max}$  主峰数量相比, #19 和 #24 土样的较少,这与测线的长度和分布位置有关。

综上所述,可以观察到剪切带方向上  $\gamma_{\max}$  的主峰的3种演变方式:①当  $\varepsilon_a$  达到某一值时,某处测点的  $\gamma_{\max}$  发生突增(尽管可能不是全局峰值),此后,该处的  $\gamma_{\max}$  一直以较快的速度增加,直到成为主峰。可从土样中某处存在缺陷对方式1的根源进行解释。②当  $\varepsilon_a$  在一定范围内时,某处测点的  $\gamma_{\max}$  尽管较高,但并不比其周围有些测点的  $\gamma_{\max}$  高,也就是说,该测点的  $\gamma_{\max}$  只是一个小范围内的局部峰值。随着加载的进行,由于宏观上剪切带之间的相互影响及微观上微结构之间的相互作用,该处逐渐赢得了竞争的优势,最终成长为一个主峰。③当  $\varepsilon_a$  在一定范围内时,某处测点的  $\gamma_{\max}$  一直较低,且其两侧附近测点的  $\gamma_{\max}$  较高,这可能是由于此处的材料较为密实,而其两侧的材料较为正常或存在缺陷。随着加载的进行,应力发生转移和重分布,使该处的应力较高,材料发生损坏,从而最终成长为一个主峰。

### 3.5 测线上 $\gamma_{\max}$ 的统计

下面,对3个土样中共计4条测线上  $\gamma_{\max}$  的分布及演变规律进行统计,以获得剪切带萌生的条件。由图8~10可以发现:

(1) 总体上,最大剪切应变的均值和标准差两种统计结果随着纵向应变的增加而增加,而且,增加的速度越来越快。

(2) 当  $\varepsilon_a$  较低时,上述两种统计结果随纵向应变的增加基本上呈线性规律,对于同一土样的不同测线,上述线性规律消失所对应的时刻或纵向应变基本相同。例如,对于 #10 土样中的两条测线,当  $\varepsilon_a > 0.03$  时,两种统计量随  $\varepsilon_a$  的增加不再呈线性;当  $\varepsilon_a = 0.03$  时,  $\gamma_{\max}$  的均值分别为 0.0924 和 0.1087(以较小的  $\gamma_{\max}$  的均值作为剪切带萌生的阈值)。对于不同土样,两种统计结果由线性向非线性转变的时刻或纵向应变不同。#19 和 #24 土样的两种统计结果分别在  $\varepsilon_a > 0.04$  和  $\varepsilon_a > 0.05$  时已呈非线性,当  $\varepsilon_a = 0.04$  和  $\varepsilon_a = 0.05$ ,  $\gamma_{\max}$  的均值分别为 0.0813 和 0.1398。

统计量的演变规律发生变化,意味着在加载过程中变形模式发生转变,例如,从均匀变形模式向局部化变形模式转变。由图8~10可以发现,两种统计量在纵向应变达到一定值后偏离线性是一种共性,可以推测统计量的这种变化在很大程度上是由于剪切带出现造成的。当某一个数据点偏离其前面的数据点形成的线性规律明显时,可凭借肉眼识别出剪切带萌生的条件。

综上所述,可以认为  $\gamma_{\max}$  的均值分别达到 0.0924, 0.0813, 0.1398 时, #10, #19 及 #24 土样的剪切带开始萌生。可以发现, #24 土样对应的剪切带萌生阈值最高,这与其含水率最高且土样较软有关。#19 和 #10 土样的阈值较低,这与其含水率较低且土样较硬有关。

图13给出了图12的局部放大图,重点关注压应力  $\sigma_a$  - 纵向应变  $\varepsilon_a$  曲线由近似线性阶段向硬化阶段转变的阶段,同时,给出了3个土样剪切带萌生所对应的纵向应变,倾斜的虚线是线性硬化阶段的线性回归结果。由此可以发现,剪切带萌生于线性硬化阶段的初期阶段;在近似线性阶段与线性硬化阶段之间,还存在一个非线性阶段。两种统计量由线性向非线性变化的转折点恰位于硬化阶段,这也说明了上述推测在一定程度上是合理的。

### 3.6 剪切局部化区域百分比的演变

以上面获得的3个土样的剪切带萌生阈值作为依据,可以方便地获得不同  $\varepsilon_a$  时土样中超过上述阈值的区域的尺寸与总体尺寸之比(剪切局部化区域百分比)的变化规律。需要指出,总体尺寸并非土样的高度与宽度之乘积,而是经双三次样条插值之后的数据点数(353行189列,约为原数据点数89行48列的16倍),相应地,超过上述阈值的区域的尺寸是指插值后超过上述阈值的数据点数。由图11可以发现:

(1) 总体上,随着纵向应变  $\varepsilon_a$  的增加,3个土样

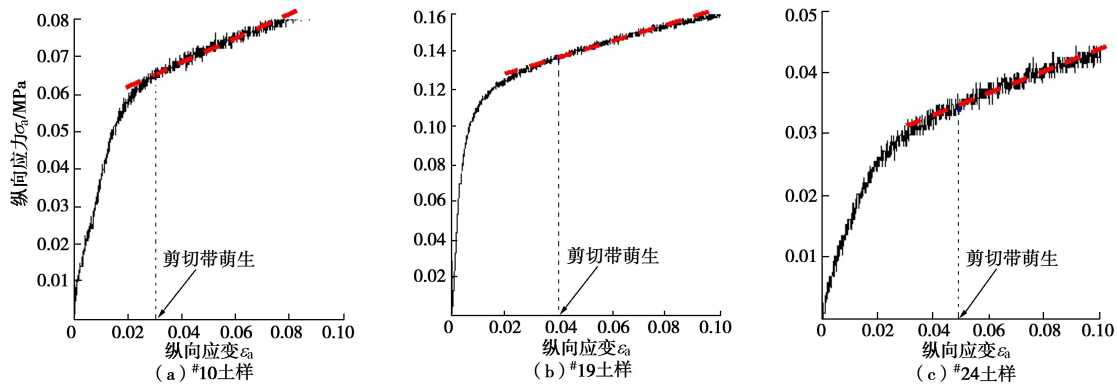


图 13 3 个土样的压应力  $\sigma_a$  - 纵向应变  $\epsilon_a$  曲线的局部放大图及剪切带萌生

Fig. 13 Close-up stress-strain curves of three soil specimens and occurrence of shear bands

剪切局部化区域百分比不断增加, 呈上凸趋势, 增加的速度越来越慢。

(2) 当  $\epsilon_a$  较低时, 欲达到同样的剪切局部化区域百分比, 含水率高的土样需要的  $\epsilon_a$  较高。例如, 剪切局部化区域百分比欲达到 40%, #19 和 #10 土样的  $\epsilon_a$  分别需要达到 0.045 和 0.05 左右, 而 #24 土样的  $\epsilon_a$  需要达到 0.08 左右。

(3) 当  $0.04 < \epsilon_a < 0.127$  时, 在相同  $\epsilon_a$  时, 含水率越低的土样的剪切局部化区域百分比越大。例如, 当  $\epsilon_a = 0.08$  时, #19 土样的剪切局部化区域百分比约为 72%, #10 和 #24 土样的剪切局部化区域百分比分别约为 67% 和 40%。当  $\epsilon_a < 0.04$  时, 在相同  $\epsilon_a$  时, #10 和 #19 土样的剪切局部化区域百分比相差不大, 均明显高于 #24 土样。

(4) 当  $\epsilon_a > 0.135$  时, 在相同  $\epsilon_a$  时, #24 土样的剪切局部化区域百分比高于另外两个土样。这意味着 #24 土样中剪切带所占的区域比另外两个土样更广, 剪切带在各处均得到了充分的发展 (这与图 4 (f) 的结果相一致), 这与该土样的含水率较高, 且塑性变形阶段较长有关。最终, #10 和 #19 土样的剪切局部化区域百分比超过 80%, 而 #24 土样的剪切局部化区域百分比超过 90%。

## 4 结 论

(1) 沿土样剪切带方向的最大剪切应变的分布并不均匀, 随着纵向应变的增加, 由低值多峰向高值少峰转变。当纵向应变达到一定值时, 剪切带上最大剪切应变发生突增的点、局部高值点及低值点均有可能发展成为主峰, 这与宏观上剪切带之间的相互影响、细观上微结构之间的相互作用及材料缺陷的存在有关。

(2) 随着纵向应变的增加, 最大剪切应变的均值和标准差的演变具有类似的规律, 均呈上凹形。在纵

向应变较低时, 两种统计量基本呈线性。以两种统计量由线性向非线性变化的转折点 (处于应力 - 应变曲线上线性硬化阶段的初期) 作为剪切带萌生的条件。

(3) 随着纵向应变的增加, 土样中的剪切局部化区域百分比呈上凸形。当纵向应变较低时, 含水率高的土样欲达到与含水率低的土样相同的剪切局部化区域百分比, 需要较高的纵向应变。当纵向应变较高时, 含水率高的土样的剪切局部化区域百分比能超过含水率低的土样, 这与其塑性变形阶段较长且剪切带遍布砂土试样各处有关。在微裂纹刚出现时, 含水率为 13.6%~14.7% 的土样, 剪切局部化区域百分比超过 80%, 而含水率为 17.2% 的土样, 剪切局部化区域百分比超过 90%。

## 参考文献:

- [1] HALL S A, BORNERT M, DESRUES J, et al. Discrete and continuum analysis of localised deformation in sand using X-ray  $\mu$ CT and volumetric digital image correlation[J]. Géotechnique, 2010, 60(5): 315 - 322.
- [2] MICHALOWSKI R L, SHI L. Deformation patterns of reinforced foundation sand at failure[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 2003, 129(6): 439 - 449.
- [3] 黄茂松, 李学丰, 钱建固. 各向异性砂土的应变局部化分析[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(10): 1772 - 1780. (HUANG Mao-song, LI Xue-feng, QIAN Jian-gu. Strain localization of anisotropic sand[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(10): 1772 - 1780. (in Chinese))
- [4] 蒋明镜, 彭 镐, 申志福, 等. 深海能源土剪切带形成机理离散元分析[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(9): 1624 - 1630. (JIANG Ming-jing, PENG Di, SHEN Zhi-fu, et al. DEM analysis on formation of shear band of methane hydrate bearing soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,



- 2014, **36**(9): 1624 - 1630. (in Chinese))
- [5] 蔡正银. 砂土的渐进破坏及其数值模拟[J]. 岩土力学, 2008, **29**(3): 580 - 585. (CAI Zheng-yin. Progressive failure of sand and its numerical simulation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, **29**(3): 580 - 585. (in Chinese))
- [6] 曾亚武, 黎玲, 熊俊, 等. 基于塑性体积应变的梯度塑性理论研究[J]. 长江科学院院报, 2012, **29**(8): 7 - 11, 51. (ZENG Ya-wu, LI Ling, XIONG Jun, et al. Gradient plasticity theory based on plastic bulk strain[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2012, **29**(8): 7 - 11, 51. (in Chinese))
- [7] 邵龙潭, 王助贫, 刘永禄. 三轴土样局部变形的数字图像测量方法[J]. 岩土工程学报, 2002, **24**(2): 159 - 163. (SHAO Long-tan, WANG Zhu-pin, LIU Yong-lu. Digital image processing technique for measurement of the local deformation of soil specimen in triaxial test[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, **24**(2): 159 - 163. (in Chinese))
- [8] 唐洪祥, 董益峰, 张兴. 滚动机制对颗粒材料剪切带形成的影响[J]. 水利与建筑工程学报, 2014, **12**(4): 107 - 111. (TANG Hong-xiang, DONG Yi-feng, ZHANG Xing. The effects of rolling resistance on the formation of shear bands for granular materials[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2014, **12**(4): 107 - 111. (in Chinese))
- [9] 郭莹, 王健. 基于图像测量的饱和细砂排水剪切试验研究[J]. 岩土力学, 2012, **33**(1): 24 - 30. (GUO Ying, WANG Jian. Study of drained shear tests of saturated fine sand based on digital image measuring[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, **33**(1): 24 - 30. (in Chinese))
- [10] 李元海, 朱合华, 上野胜利, 等. 基于图像相关分析砂土试验模型变形场量测[J]. 岩土工程学报, 2004, **26**(1): 36 - 41. (LI Yuan-hai, ZHU He-hua, KATSUTOSHI U, et al. Deformation field measurement for granular soil model using image analysis[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, **26**(1): 36 - 41. (in Chinese))
- [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. (in Chinese))
- [12] 王学滨, 杜亚志, 潘一山, 等. 基于DIC粗-细搜索方法的单向压缩砂样的侧向变形观测研究[J]. 工程力学, 2013, **30**(4): 184 - 190. (WANG Xue-bin, DU Ya-zhi, PAN Yi-shan, et al. Lateral deformation measurements for sand specimens under uniaxial compression based on digital image correlation with coarse-fine search method[J]. Engineering Mechanics, 2013, **30**(4): 184 - 190. (in Chinese))
- [13] 王学滨, 杜亚志, 潘一山. 单轴压缩湿砂样局部及整体体积应变的数字图像相关方法观测[J]. 岩土工程学报, 2014, **36**(9): 1648 - 1656. (WANG Xue-bin, DU Ya-zhi, PAN Yi-shan. Measurements of local and global volumetric strains for wet sand specimens under uniaxial compression using digital image correlation method[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, **36**(9): 1648 - 1656. (in Chinese))