

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2016.04.021

砂土试样剪切带发展过程分析

王 婷,唐洪祥

(大连理工大学 海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024)

摘 要: 剪切带的发生与发展是土体失稳乃至破坏的重要因素,因而剪切带的发展过程分析具有很高的研究价值。基于考虑了滚动机制在内的颗粒离散元数值方法,以及基于数字图像测量技术的平面应变试验方法有效地模拟和再现了砂土试样在平面应变条件下剪切带的发展破坏过程,从而合理的解释了其破坏机理。结果表明,剪切带在荷载达到峰值之前起始和发展,形成于峰值之后;在剪切带完全形成后,荷载基本上稳定在一残余值。同时,结果还表明,采用考虑滚动机制在内的颗粒接触模型以及提出的等效应变和体积应变的计算方法用以模拟颗粒材料剪切带破坏现象是有效的。

关键词: 离散元;滚动机制;平面应变实验;剪切带;砂土

中图分类号: TU441+.4

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2016)04-0102-05

Analysis of the Development Process of Shear Band in Sand Sample

WANG Ting, TANG Hongxiang

(State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China)

Abstract: The occurrence and development of shear band is an important factor of soil instability and destruction, thus the development of shear band analysis has great research value. Based on the discrete element numerical method including the rolling mechanisms and the plane strain test method with digital image measurement technology, the development of the shear band failure process in sand sample was effectively simulated and reproduced under the condition of plane strain, the failure mechanism has been reasonably explained. The results showed that the shear band started and developed before the peak load, and formed after the peak, the load kept unchanged at a residual value after the shear band was fully formed. Meanwhile, the results showed that the particle contact model incorporating scrolling mechanism and the calculation methods for equivalent strain and volumetric strain are effective in the simulation of shear band failure in granular material.

Keywords: discrete element; scrolling mechanism; plane strain test; shear band; sand

外荷作用下材料破坏失稳常伴随着材料局部狭窄区域的剧烈变形。此剧烈变形的局部狭窄区域称为剪切带。研究材料受力变形的剪切带发展过程对理解材料的变形破坏机理尤为重要^[1-2]。

实际工程中砂土的变形破坏常表现为剪切带破坏模式,目前对于其局部化破坏机理的探讨主要依赖于数值模拟和实验研究。从数值模拟的角度看,

离散单元法成为模拟土体等颗粒材料剪切带发生机理的有效手段^[3], Iwashit K^[4-5]使用离散单元法探讨了剪切带形成过程的细观机制。Oda M等^[6-8]通过大量的数值模拟及实验研究提出在颗粒间的接触关系中考考虑引入滚动机制能更好地模拟颗粒材料剪切带。O'Sullivan等^[9]结合数值模拟和物理模型实验做了砂土剪切带的相关研究。

收稿日期:2016-03-20

修稿日期:2016-04-14

基金项目:国家重点基础研究发展规划(973)项目(2010CB731502)及中央高校基本科研业务费专项资金项目(DUT16DZ211)资助

作者简介:王 婷(1990—),女,宁夏石嘴山人,硕士研究生,研究方向为岩土工程。E-mail:tingwang1990@163.com

通讯作者:唐洪祥(1973—),男,湖南天门人,博士,副教授,主要从事岩土力学方面的研究工作。E-mail:tanghx@dlut.edu.cn

本文针对砂土在平面应变状态下的剪切带破坏现象,拟通过建立离散单元数值模型,考虑引入滚动机制,从平面应变变形过程中的体积应变、有效应变以及应力应变关系等方面分析剪切带的发展过程^[10-12]。同时,为进一步阐明砂土试样的剪切带发展过程,对一砂土试样进行了初步的试验研究^[13]。

$$\begin{cases} F_n = k_n U_n + c_n \frac{dU_n}{dt} \\ F_t = F_s + F_r = \min(k_s U_s + c_s \frac{dU_s}{dt}, \mu_s |F_n|) + \min(k_r U_r + c_r \frac{dU_r}{dt}, \mu_r |F_n|) \\ M_r = -\min(k_\theta \theta_r + c_\theta \frac{d\theta_r}{dt}, \mu_\theta r |F_n|) \end{cases} \quad (1)$$

式中: F_n 、 F_s 、 M_r 、 F_r 分别为颗粒间的法向接触力、切向接触力、接触力矩和滚动摩擦力; k_n 、 k_s 、 k_r 、 k_θ 分别为法向接触刚度、切向接触刚度、切向滚动阻力刚度系数、滚动阻矩刚度系数; U_n 、 U_s 、 U_r 、 θ_r 分别为法向位移、切向滑动位移、滚动位移及滚转角; c_n 、 c_s 、 c_r 、 c_θ 、 μ_s 、 μ_r 、 μ_θ 分别为法向阻尼系数、切向阻尼系数、切向滚动阻尼系数、滚动阻矩阻尼系数、切向滑动摩擦系数、切向滚动摩擦系数、滚动摩擦系数。

1.2 平面应变压缩试验模型的生成

使用编制的离散程序生成有 4 950 个半径为 5 mm 的均质颗粒模型,在模型上下两端添加刚性板施加竖向位移荷载,并在试样两侧施加恒定均布的 $\sigma_3 = 100$ kPa 围压,生成模型如图 1 所示^[11,14],颗粒离散元模拟的材料参数如表 1。

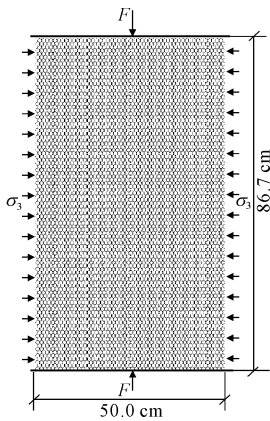


图 1 双轴压缩数值模型

1.3 剪切带形成过程分析

对上述的离散元数值模型进行数值分析,得到了轴向应力应变曲线,如图 2 所示。可见当轴向应变 $\epsilon_1 = 2.1\%$ 时,应力达到峰值。所在轴向应变对应的试样变形图,图 3 为轴向应力应变曲线中 1~8

1 离散元数值模型模拟剪切带的形成过程

1.1 考虑滚动机制接触模型

颗粒间接触作用采用 Iwashita K 等^[4]提出的 MDEM 接触模型。

相邻两颗粒间接触作用可以式(1)表示为

点的有效应变云图和体积应变云图。

表 1 数值模拟参数

颗粒属性	属性值
颗粒密度 $\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	2600
法向接触刚度系数 $k_n / (\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$	2.5×10^8
切向接触刚度系数 $k_s / (\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$	2.5×10^7
切向滚动阻力刚度系数 $k_r / (\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$	1.0×10^6
滚动阻矩刚度系数 $k_\theta / (\text{Nm} \cdot \text{rad}^{-1})$	2.50
法向阻尼系数 $c_n / (\text{Ns} \cdot \text{m}^{-1})$	0.02
切向阻尼系数 $c_s / (\text{Ns} \cdot \text{m}^{-1})$	0.02
切向滚动阻尼系数 c_θ	0.10
切向滑动摩擦系数 μ_s	0.50
切向滚动摩擦系数 μ_r	0.10
滚动摩擦系数 μ_θ	0.05

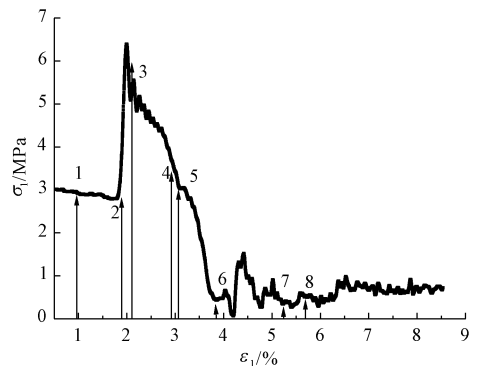


图 2 滚动机制情况下模型的轴向应力 - 应变图

在 $\epsilon_1 = 1.9\%$ 时(对应图 2 的点 2),轴向应力逐渐增加,试样四个角点处的颗粒位置变化明显,剪切带开始发展;当 $\epsilon_1 = 2.1\%$ 时(对应图 2 的点 3),轴向应力达到峰值,试样对角线上的颗粒位移变化较明显,剪切带有明显发展;当轴向应变进一步增加,达到 2.8%(点 4)、3.1%(点 5)直到 3.8%(点 6),剪切带进一步发展贯通,形成“X”型剪切带;同时,轴向

应力迅速降低,一度降至 0.3 MPa;此后轴向应力略有上升,并基本保持在 0.5 MPa 上下波动。从点 7、点 8 对应的变形可见,最终形成了清晰可见的剪切带。

为了更形象地显示剪切带的发展和形成过程,图 3(a)~图 3(h)给出了上述各点对应的试样有效应变(左边)及体积应变云图(右边)。在轴向应变达到 0.95% 时图 3(a)(图 2 点 1)有效应变与体应变变化均匀,在四角处出现应变局部化现象;在轴向应变

达到 1.9% 时,有效应变及体应变在四个角点处进一步发展,有沿对角线发展剪切带的趋势;当轴向应变达到 2.1% 时,剪切带由四角沿对角线进一步发展,此时轴向应力达到峰值;在轴向应变达到 2.8% 后,有效应变及体应变沿对角线贯通,“X”型剪切带基本形成,伴随此过程的是轴向应力由峰值明显下降;当轴向应变到达 3.8% 后,剪切带完全形成,其宽度也不再变化,轴向应力也基本保持稳定。

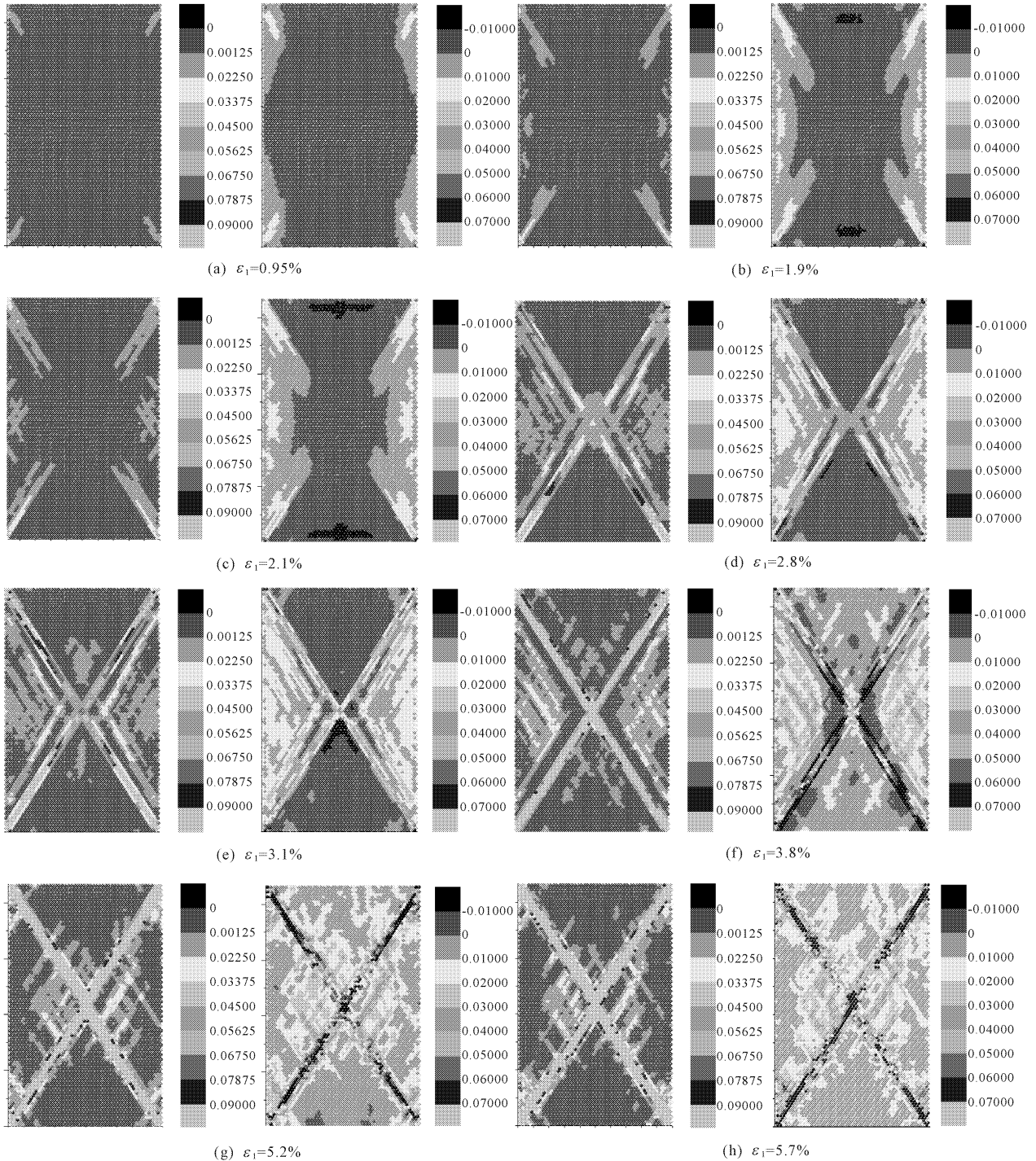


图 3 滚动机制情况下模型有效应变体应变图

从上面分析可见,本文的离散元数值结果清晰地显示出了剪切带的发展形成过程,剪切带在荷载达到峰值之前起始和发展,形成于峰值之后。在剪切带完全形成后,荷载基本上稳定在一残余值。同时,可以看出,本文采用考虑了滚动机制在内的颗粒接触模型以及提出的等效应变和体积应变的计算方法在模拟颗粒材料剪切带破坏现象是有效的。

2 砂土剪切带破坏现象的平面应变实验

为进一步阐明砂土试样的剪切带发展过程,本文利用大连理工大学新近研制的平面应变仪并结合数字图像测量系统对一砂土试样进行了剪切带破坏的初步试验研究。

2.1 新型平面应变仪

新型平面应变仪主要组成部分包括压力室、加载系统、控制系统与数字图像系统及相关附属设备^[15]。

2.2 砂土平面应变实验

所用砂土的各项物理性质指标见表 2。

表 2 砂土物理性质各项指标

物理性质指标	指标值
相对密度 $D_r/\%$	60.00
平均粒径 d_{50}/mm	0.23
干密度 $\rho_d/(\text{g}\cdot\text{m}^{-3})$	1.56
最小干密度 $\rho_{d\min}/(\text{g}\cdot\text{m}^{-3})$	1.33
最大干密度 $\rho_{d\max}/(\text{g}\cdot\text{m}^{-3})$	1.77
曲率系数 c_c	1.73
不均匀系数 c_u	3.33

对试样施加 100 kPa 的围压进行固结排水试验,然后以 0.2%/min 的剪切速率进行排水剪切,剪切过程中采用数字图像系统进行表面图像采集。根据采集到的数据,进一步整理分析得到轴向应变和体积应变等。

2.3 实验结果分析

由实验所得数据计算整理得到轴向应力应变曲线如图 4 所示,采集得到的几个典型时刻的变形图如图 5 所示。为了能够更加清晰地看到试样剪切带,使用 surfer 软件绘制轴向应变及体积应变等值线分布图如图 6 所示,图 6 左边图代表轴向应变,右边代表体积应变。下面将选取轴向应力应变曲线上 A—D 点对应的各轴向应变时刻分析剪切带的发展

过程。

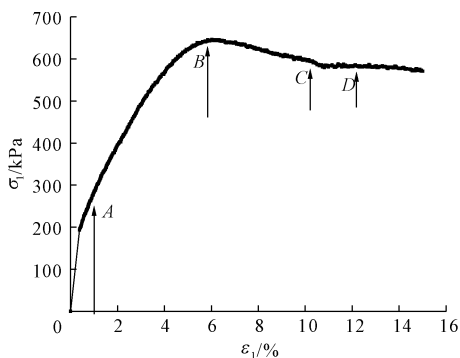


图 4 平面应变实验轴向应力 - 应变图

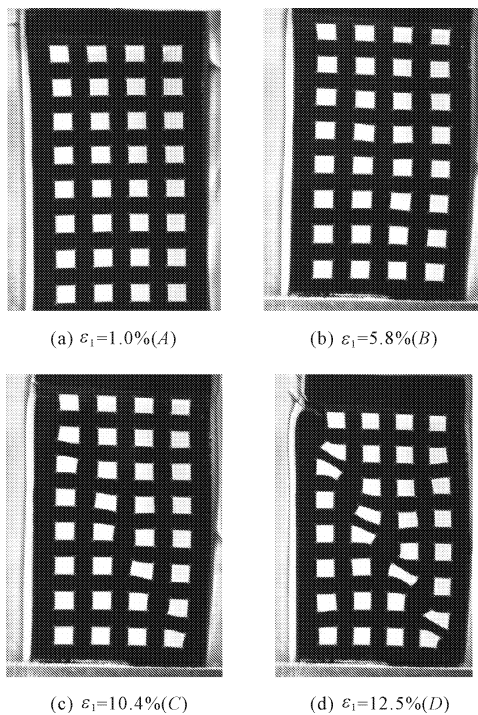


图 5 试样变形实测图

图 5 和图 6 显示当轴向应变时(图 4A 点、图 5(a)及图 6(a)),试样局部区域出现不均匀变形;当轴向应变达到 5.8%时(图 4B 点、图 5(b)及图 6(b)),轴向应力达到峰值,此时试样中剪切带有所发展;当轴向应变达到 10.4%、12.5%时(图 4C 点和 D 点、图 5(c)和(d)及图 6(c)和(d)),试样轴向应力达到稳定状态,并可以观察到清晰且具有一定宽度的剪切带。

从以上平面应变试验结果看,剪切带在荷载达到峰值之前起始和发展,完全形成于峰值之后,且在剪切带完全形成后,荷载基本上稳定在一残余值,得到了与数值模拟类似的结果。

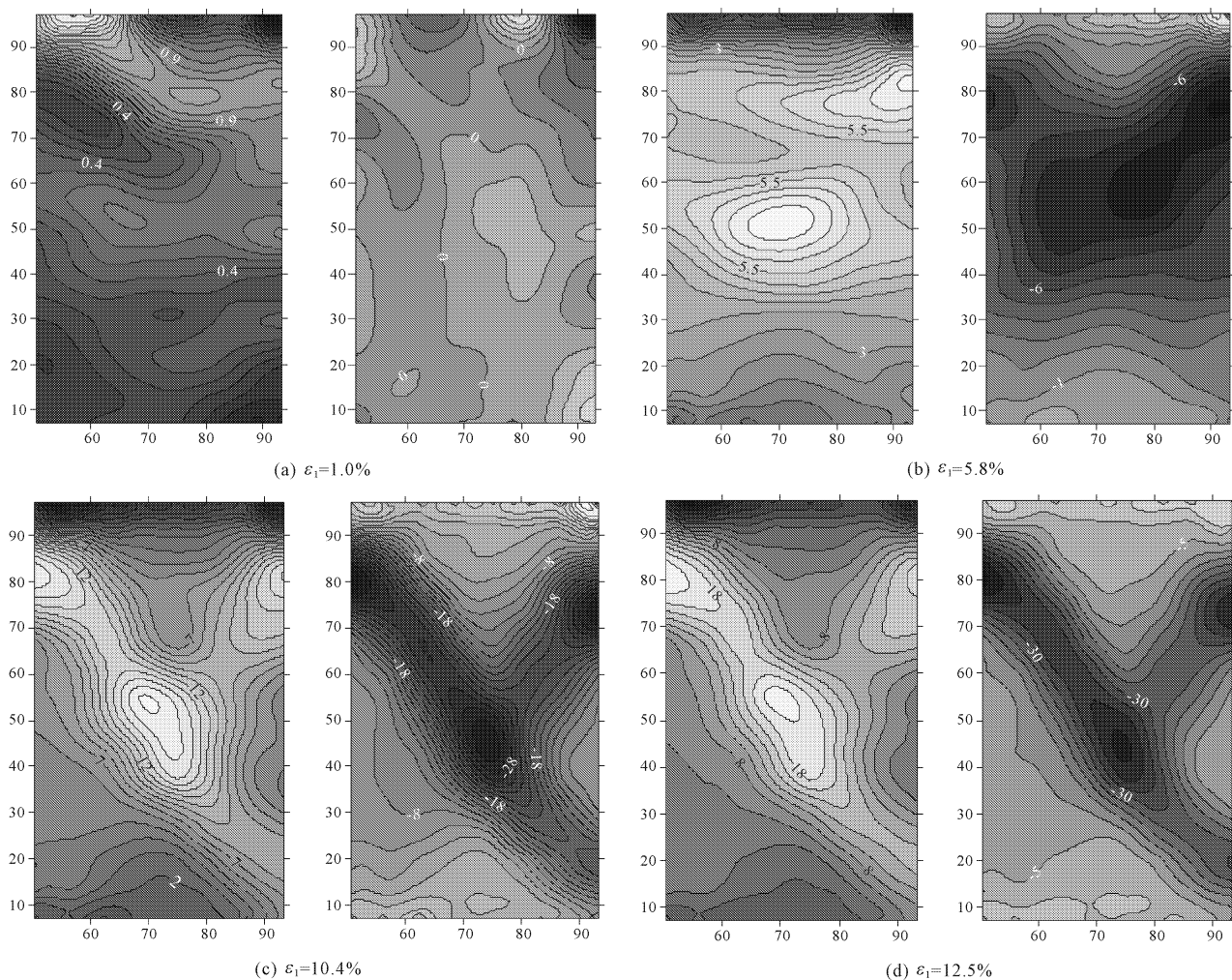


图 6 试样轴向应变和体积应变等值线图

3 结 论

基于数值模拟及平面应变试验分析研究了砂土剪切带破坏的发展过程,得到了类似一致的结论,即:剪切带在荷载达到峰值之前起始和发展,形成于峰值之后。在剪切带完全形成后,荷载基本上稳定在一残余值。

另外,结果显示采用考虑了滚动机制在内的颗粒离散元数值方法,以及基于数字图像测量技术的平面应变试验方法在模拟和再现剪切带发展破坏过程是有效的。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 蒋明镜,彭立才,朱合华,等.珠海海积软土剪切带微观结构试验研究[J].岩石力学,2010,31(7):2017-2023.
- [3] O'Sullivan Catherine, Liang Cui. Micromechanics of granular material response during load reversals: Combined DEM

and experimental study[J]. Powder Technology, 2009,193: 289-302.

- [4] Iwashita K, Oda M. Micro-deformation mechanism of shear banding process based on modified distinct element method [J]. Powder Technology, 2000,109(1/3):192-205.
- [5] Iwashita K, Oda M. Rolling resistance at contacts in simulation of shear band development by DEM[J]. Journal of Engineering Mechanics, 1998,124(3):285-292.
- [6] Oda M, Takemura T, Takahashi M. Microstructure in shear band observed by microfocus X-ray computed tomography [J]. Geotechnique, 2004,54(8):539-542.
- [7] 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.
- [8] Oda M, Iwashita K. Mechanics of Granular Materials[M]. Rotterdam: A. A. Balkema, 1999.
- [9] O'Sullivan Catherine, Liang Cui. Micromechanics of granular material response during load reversals: Combined DEM and experimental study[J]. Powder Technology, 2009,193:289-302.

(下转第 134 页)

(上接第 106 页)

- [10] 唐洪祥,张 兴,管毓辉.等.颗粒材料变形破坏与影响因素的细宏观分析[J].大连理工大学学报,2013,53(4):543-550.
- [11] 楚锡华.颗粒材料的离散颗粒模型与离散-连续耦合模型及数值方法[D].大连:大连理工大学,2007.
- [12] Li Xikui, Du Youyao, Duan Qinglin. Micromechanically informed constitutive model and anisotropic damage characterization of Cosserat continuum for granular materials[J]. International Journal of Damage Mechanics, 2013,22(5):643-682.
- [13] 施维成,朱俊高,张坤勇,等.平面应变条件下粗粒土的变形特性试验研究[J].岩土力学,2013,34(1):101-108.
- [14] 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.
- [15] 唐洪祥,张丽娟.平面应变试验与常规三轴试验条件下含细粒土砂力学特性比较研究[J].水利与建筑工程学报,2015,13(5):223-227.