

DOI:CNKI:61-1390/S.20120109.1225.013

网络出版时间:2012-01-09 12:25

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20120109.1225.013.html>

# 基于动变形试验的黄土剪切带特性研究

李浩东<sup>1</sup>, 骆亚生<sup>1</sup>, 王志杰<sup>1,2</sup>, 程大伟<sup>1</sup>

(1 西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100;

2 亚琛工业大学 岩土工程研究所, 德国 亚琛 52074)

**[摘 要]** **【目的】**分析动荷载条件下黄土局部化变形的判断依据和剪切带的特性,探究不同初始应力条件对非饱和黄土剪切带特性的影响。**【方法】**用动扭剪仪进行陕西杨凌非饱和黄土的动变形试验,分析其动本构关系曲线、动孔隙气压力和阻尼比的变化规律,探讨初始平均主应力和初始主应力方向角对剪切带倾角的影响。**【结果】**土样的动本构关系曲线、动孔隙气压力随时间变化曲线和阻尼比随动剪应变变化曲线皆为非线性型,其变化规律很好地体现了局部化变形的过程。当初始主应力方向角 $<45^\circ$ 时,土样的剪切带倾角随着初始平均主应力的增加而呈增加趋势;当初始主应力方向角 $\geq 45^\circ$ 时,剪切带倾角随着初始平均主应力的增加呈减小趋势。在初始主应力方向角 $<45^\circ$ 时,剪切带倾角随着初始主应力方向角的增大而减小;当主应力方向角为 $90^\circ$ 时,土样未出现剪切带。**【结论】**动荷载作用下,黄土会发生局部化变形,这种局部化变形的出现和发展可以用动孔隙气压力和阻尼比的变化规律来判别,该判别方法意义明确且合理可行;初始平均主应力、初始主应力方向角对黄土的剪切带倾角有一定影响。

**[关键词]** 黄土;动力特性;动变形;初始主应力方向角;剪切带

**[中图分类号]** TU411

**[文献标识码]** A

**[文章编号]** 1671-9387(2012)02-0227-08

## Characteristics of shear bands in loess under test of dynamic deformation

LI Hao-dong<sup>1</sup>, LUO Ya-sheng<sup>1</sup>, WANG Zhi-jie<sup>1,2</sup>, CHENG Da-wei<sup>1</sup>

(1 College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2 Institute of Geotechnical Engineering, RWTH Aachen University, Aachen 52074, Germany)

**Abstract:** **【Objective】**Localized deformation of loess under dynamic load has been studied to find the judgment basis for appearing of localized deformation and to analyze the characteristics of shear band in loess. At the same time, the effect of different initial stress state on the properties of shear band has been studied. **【Method】**Test of dynamic deformation were conducted by a hollow torsional cyclic load triaxial apparatus to study the change law of dynamic constitutive relationship curve, dynamic pore air pressure, damping ratio, and analyze the influence of initial angle of principal stress and average initial principal stress on angle of shear band in loess. **【Result】**The dynamic constitutive relationship curve, the time-travel of dynamic pore air pressure curve, and the curve of dynamic damping ratio with shear strain change of sample have a variation feature of nonlinear which describes the process of localized deformation well. The results show that the angle of shear band has an increasing trend, as the average initial principal stress increases when initial angle of principal stress is less than  $45^\circ$  and decreases as the average initial principal stress increases when initial angle of principal stress is more than  $45^\circ$ . The angle of shear band decreases when ini-

\* [收稿日期] 2011-07-19

[基金项目] 国家自然科学基金项目(50578134);教育部新世纪优秀人才支持计划项目(NECT-06-0864)

[作者简介] 李浩东(1985—),男,陕西定边人,在读硕士,主要从事黄土力学与工程研究。E-mail:522915641@qq.com

[通信作者] 骆亚生(1967—),男,陕西泾阳人,教授,博士生导师,主要从事黄土动力学研究。E-mail:yt02@nwsuaf.edu.cn

tial angle of principal stress increases from 0° to 45°, and when initial angle of principal stress is equal to 90°, there is no shear band in specimen. 【Conclusion】 Localized deformation of loess would happen under dynamic load. It is reasonable and feasible to use the time-travel of dynamic pore air pressure curve, and the curve of dynamic damping ratio with shear strain change to judge the appearance and development of localized deformation in loess. Initial stress state has a definite influence on the angle of shear band.

**Key words:** loess; dynamic characteristics; dynamic deformation; initial angle of principal stress; shear band

黄土广泛分布于我国中西部地区,并且多集中分布于地质构造活动比较强烈的地震多发、烈度较高的地区,又加之黄土所具有独特的地质、地貌特点和土力学特性,使其在地震作用下往往会发生大范围、大规模的滑坡<sup>[1]</sup>,给当地人民生命和财产造成了巨大损失。

造成滑坡事故的外因虽然很多,但根本的原因是土体内部存在初始缺陷,使得土体在受到外荷时某些有缺陷的区域由于应力不均匀等因素首先产生屈服,即出现不均匀变形,并不断向邻近区域扩散,最终形成一个急剧不连续变形的带状区域,该带状区域即为剪切带<sup>[2]</sup>。剪切带在材料中的出现和发展,说明材料的破坏是一个局部、渐进的过程<sup>[3]</sup>。在坡体中,当剪切带贯通或者接近贯通时,就会发生滑坡事故。

土体局部化变形的研究方法有室内试验、数值模拟和理论研究等<sup>[2]</sup>,研究的主要内容有剪切带产生的条件和剪切带产生后材料的变形特性等<sup>[4]</sup>。目前,国内外学者对土体局部化变形的研究主要集中在静力荷载条件下。Finno 等<sup>[5]</sup>在平面应变条件下研究了饱和松砂的剪切带现象,认为局部化变形出现在均匀变形阶段之后,剪切带内土体存在剪胀现象;董建国等<sup>[6]</sup>、李蓓等<sup>[7]</sup>进行了上海黏性土原状样的固结不排水平面应变试验,指出剪切带开始出现在应力峰值前,形成于峰值后,剪切带出现的试样会出现应变软化特性,剪切带与附近土体的水力交换,也即孔隙水的迁移可能是造成剪切带产

生的原因。蒋刚等<sup>[8]</sup>通过对南京粉土和粉质黏土的三轴试验分析指出,剪切带也可能发生在应力应变曲线硬化阶段。喻兼临等<sup>[9]</sup>进行了结构性土中剪切带扩展的研究,认为由于土体的应变软化特性,已有的剪切带尖端附近区域将存在应力集中和应力重分布现象,并进而导致剪切带尖端附近区域的应力主轴偏转现象。蔡正银等<sup>[2]</sup>通过砂土的数值模拟分析认为,应变局部化主要是由于材料本身或者几何边界的缺陷造成。众多试验研究均指出,利用 M-C 理论预测的剪切带倾角和实测剪切带倾角更为接近<sup>[3,5-7]</sup>。

事实上,土体在动力荷载作用下必然会发生局部化变形,但是由于受试验设备、方法和理论分析的限制而鲜有报道。鉴于此,本研究采用动应力更符合实际应力状态的动扭剪仪,尝试用一定初始条件的动力荷载作用下非饱和黄土的局部变形特性分析、剪切带倾角大小等研究方向出发,探究土体在动荷载作用下局部化剪切变形出现与发展的判断依据,以及初始主应力方向角与初始平均主应力对剪切带倾角的影响,以期能够对实际工程问题的解决提供一些有益的参考。

1 试验方法

1.1 试验材料及试样制备

试验所用土样取自陕西杨凌,取土深度 5~6 m,属 Q<sub>3</sub> 黄土,具体物理性质指标见表 1。

表 1 试验土料的物理性质指标

Table 1 Physical indexes of experimental specimen

| 土样来源<br>Soil sample<br>source | 天然含水率/%<br>Natural<br>moisture content | 天然干密度/<br>(g·cm <sup>-3</sup> )<br>Natural dry<br>density | 相对密度<br>Relative<br>density | 液限/%<br>Liquid<br>limit | 塑限/%<br>Plastic<br>limit | 塑性指数/%<br>Plasticity<br>index | 按塑性图分类<br>Plasticity<br>classification<br>chart |
|-------------------------------|----------------------------------------|-----------------------------------------------------------|-----------------------------|-------------------------|--------------------------|-------------------------------|-------------------------------------------------|
| 杨凌 Yangling                   | 19                                     | 1.52                                                      | 2.71                        | 27.6                    | 16.5                     | 11.1                          | CL                                              |

本次试验所用试样皆为原状土样,采用与仪器配套的专用削样器削制钻孔而成的外径 70 mm、内径 30 mm、高 100 mm 的空心圆柱样。由于在削样

过程中会有水分散失,故在削样结束后重新称质量,用洒水法严格控制土样的含水率为 19%,并用保鲜袋包裹,静置于养护缸内养护 48 h 后待用。

1.2 试验仪器

试验所用仪器为日本诚研株式会社生产的 DTC-199 型电液伺服周期扭转荷载三轴仪,原本该仪器的空心圆柱体内外腔为同一加压系统,通过顶盖孔隙连通,能实现内、外压相等的试验要求,后通过杨利国等<sup>[10]</sup>的改造,可实现空心圆柱试样内、外压力的分别控制,在试样的顶部同时施加竖直方向的轴力和绕空心圆柱体试样轴心的环向扭矩,从而可以实现三向非均等复杂初始应力状态的试验条件。仪器由主机、压力系统、动力控制系统和测量系

统组成,其中压力系统由水压力系统和气压力系统 2 部分组成,动力控制系统由油泵伺服机构和动力控制屏组成,测量系统由测量传感器和计算机采集系统组成,可实现试验数据的自动采集。

1.3 试样的应力状态

仪器改造后试样的应力状态如图 1(a)所示,空心圆柱试样上任一单元作用的应力有:轴力  $W$  产生的轴向应力  $\sigma_z$ ,扭矩  $M_T$  产生的剪应力  $\tau_{z\theta}$ ,内室压力  $P_i$  和外室压力  $P_o$  引起的径向应力  $\sigma_r$  和环向应力  $\sigma_\theta$ ,如图 1(b)所示<sup>[10]</sup>。

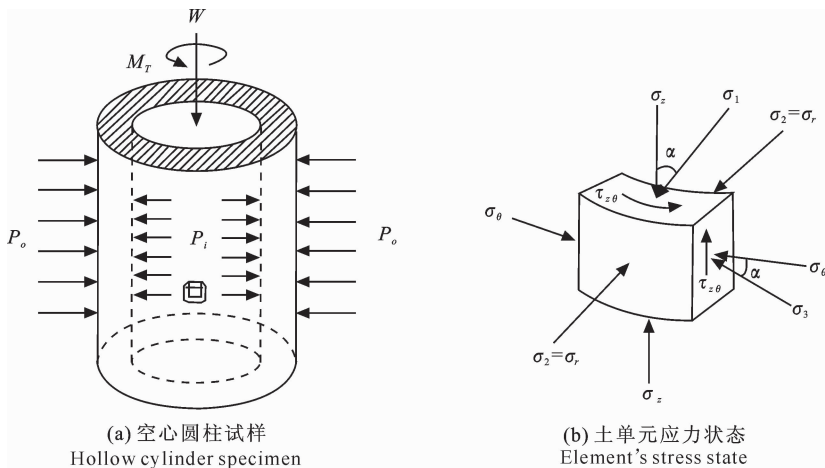


图 1 供试圆柱土样的应力状态

Fig. 1 Stress state of hollow cylinder soil specimen for test

由图 1(b)可知,土单元的应力状态可由 3 个主应力  $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$ 、 $\sigma_3$  以及初始主应力方向角  $\alpha_0$  这 4 个独立参数来表示,定义初始主应力方向角  $\alpha_0$ 、初始偏应力比  $\eta_0$ 、初始中主应力系数  $b_0$ 、初始平均主应力  $p_0$  和初始广义剪应力  $q_0$  如下:

$$\alpha_0 = \frac{1}{2} \arctan \frac{2\tau_{z\theta}}{\sigma_z - \sigma_\theta}, \quad (1)$$

$$\eta_0 = \frac{q_0}{p_0}, b_0 = \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3}, \quad (2)$$

$$p_0 = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3}, \quad (3)$$

$$q_0 = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2}. \quad (4)$$

试验时根据所需要的固结应力条件,确定初始主应力方向角  $\alpha_0$ 、初始偏应力比  $\eta_0$ 、初始中主应力系数  $b_0$  和初始平均主应力  $p_0$ ,按照文献[11]的公式,通过计算可以控制固结所需施加的外荷载  $W$ 、 $M_T$ 、 $P_i$ 、 $P_o$  的大小,从而可实现考虑  $\alpha_0$ 、 $\eta_0$ 、 $b_0$  和  $p_0$  的复杂初始应力条件。

1.4 试验方法

施加计算所得的外荷载  $W$ 、 $M_T$ 、 $P_i$ 、 $P_o$  进行固结,固结过程中排水排气,并测量轴向变形量与孔隙水压力,以 30 min 轴向变形量  $\leq 0.01$  mm、孔隙水压力变化幅值不超过 2 kPa 为稳定标准。固结完成后,关闭排水排气阀,打开计算机采集系统,采集孔隙水压力和孔隙气压力等试验数据,进行动扭转三轴试验。试验过程中,按等效正弦波的形式,在试样顶部施加周期性水平剪应力,频率为 1 Hz。试验采用同一固结状态下逐级加荷的方法,即对一个固结变形稳定后的试样,在不排水、不排气的条件下,逐级施加固定振次(10 次)的动荷载,直到试样破坏,选取具有代表性的循环所对应的动剪应力与动剪应变进行相关参数的求取。

1.5 试验方案

考虑不同初始应力状态参数的试验方案见表 2。其中当初始主应力方向角  $\alpha_0 = 0^\circ, 90^\circ$  时,按文献[11]公式计算的初始扭矩  $M_{T0} = 0$ ,而  $\alpha_0 = 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$  时,初始扭矩  $M_{T0} \neq 0$ ,即试样上存在初始预剪应力。

表 2 试验方案及初始应力状态参数

Table 2 Table of test plan and initial stress state parameters

| 试样类型<br>Samples type            | 干密度( $\rho_d$ ) /<br>( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )<br>Dry density | 含水率( $w$ ) / %<br>Moisture content | 初始应力状态参数 Initial stress state parameters |          |       |                    |
|---------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------------|----------|-------|--------------------|
|                                 |                                                                         |                                    | $\alpha_0 / (^\circ)$                    | $\eta_0$ | $b_0$ | $p_0 / \text{kPa}$ |
| 原状土样<br>Undisturbed soil sample | 1.52                                                                    | 19                                 | 0,30,45,60,90                            | 0.43     | 0.5   | 50,100,150         |

2 动荷载作用下土体剪切特性分析

在动变形试验中,一般主要研究土体的动本构关系和反映土体动力特性的参数,如动剪切模量  $G$ 、阻尼比  $\lambda$  和动孔隙压力。本次试验过程中,大部分土样出现了明显的剪切带,说明土体在加载过程中出现了局部化变形。为了研究动荷载作用下黄土的局部化变形特性,考虑动剪切模量  $G$  和动本构关系曲线的相关性,本研究将从动本构关系曲线、阻尼比、动孔隙气压力出发分析局部化变性的特性,寻求局部化变形开始的判断依据。

2.1 动剪应变典型时程曲线

图 2 为不同初始主应力方向角  $\alpha_0$  下的动剪应

变典型时程( $\gamma_d \sim t$ )曲线。从图 2 可以看出,无初始预剪应力( $\alpha_0 = 0^\circ, 90^\circ$ )时,动剪应变时程曲线沿  $\gamma_d = 0$  对称分布。有初始预剪应力( $\alpha_0 = 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ )时,动剪应变时程曲线开始向纵坐标正方向偏移,并且在  $\alpha_0 \leq 45^\circ$  时,随着  $\alpha_0$  的增加动剪应变随时间增加的幅值越大,当  $\alpha_0$  超过  $45^\circ$  时,变化规律与之相反,即在  $\alpha_0 = 45^\circ$  时动剪应变随时间增加的幅值最大。引起该现象的原因是主应力偏转以后的水平应力分量,即预剪应力的存在且随  $\alpha_0$  从  $0^\circ$  到  $45^\circ$  的增大而增大所致,这相当于增加了动剪应力的幅值。如此看来,不同的初始主应力方向角必然会对局部化变形产生影响。

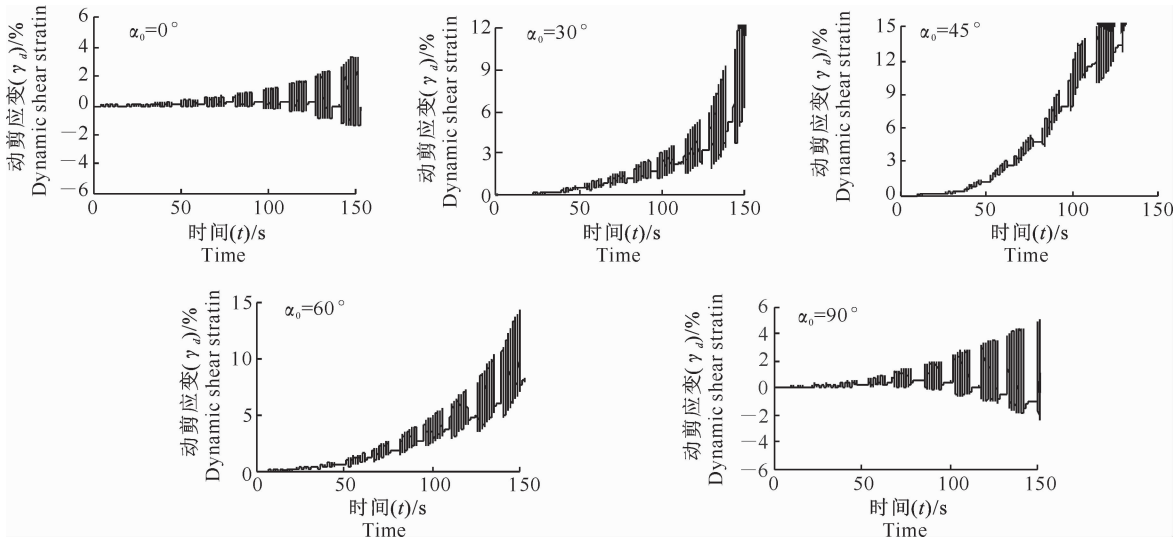


图 2 不同初始主应力方向角时动剪应变的典型时程曲线( $p_0 = 100 \text{ kPa}$ )

Fig. 2 Time-travel curve of dynamic shear strain under different initial angles of principal stress( $p_0 = 100 \text{ kPa}$ )

2.2 动本构关系曲线

动本构关系( $\tau_d \sim \gamma_d$ )曲线,也称骨干曲线,即各级动荷载下一定次数循环所对应的滞回曲线中平均最大动剪应力和平均最大动剪应变点的连线<sup>[12]</sup>。在  $w = 19\%$ ,  $\rho_d = 1.52 \text{ g/cm}^3$ ,  $\eta_0 = 0.43$ ,  $b_0 = 0.5$  时,绘制  $p_0 = 100 \text{ kPa}$  时不同初始主应力方向角下的动本构关系曲线,及  $\alpha_0 = 45^\circ$  时不同初始平均主应力下的动本构关系曲线,如图 3 和 4 所示。

从图 3,4 可以看出,初始主应力方向角越小,产生单位剪应变  $\gamma_d$  所需的动剪应力  $\tau_d$  越大;初始平

均主应力越大,产生单位剪应变  $\gamma_d$  所需的动剪应力  $\tau_d$  越大。试样的动本构曲线皆为硬化型曲线,说明将 Hardin-Drnevich 双曲线模型用于描述陕西杨凌非饱和黄土的动本构关系是合理的,因为 Hardin-Drnevich 双曲线模型并不能够考虑土体的软化特性。从试验结果来看,75%的试样都产生了明显的剪切带,为剪切带破坏型,这说明土体的软化特性和剪切带的出现并没有必然的关系,土体的软化可能是土体本身的特性所致。

另外,图 3,4 中每条曲线有一个斜率明显变缓

的转折点,结合试验中出现剪切带这一现象,可以认为曲线变缓是由局部化变形引起的,但由于硬化型

曲线不存在峰值现象,故无法用动本构关系曲线准确判断局部变形的出现和发展。

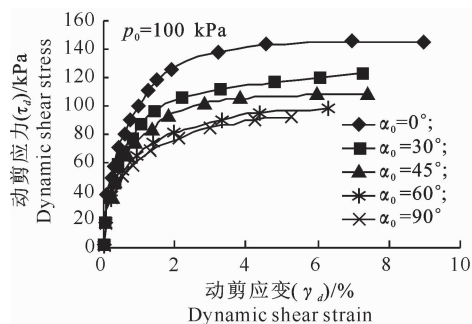


图3 不同初始主应力方向角时的动本构关系曲线

Fig. 3 Dynamic constitutive relationship curves under different initial angles of principal stresses

### 2.3 动孔隙气压力

由于试验剪切过程历时较短,而用于测定非饱和和黄土动孔隙水压力的陶土板传压具有滞后性,所以测定动孔隙水压力有困难,但是动孔隙气压力的传递却比较准确。在  $p_0 = 100 \text{ kPa}$ ,  $\alpha_0 = 0^\circ$ ,  $w = 19\%$ ,  $\rho_d = 1.52 \text{ g/cm}^3$ ,  $\eta_0 = 0.43$ ,  $b_0 = 0.5$  时,对动孔隙气压力的典型变化规律进行了分析,结果如图5所示。

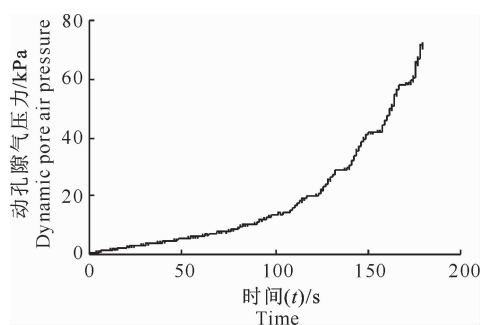


图5 动孔隙气压力随时间的变化曲线

$$w = 19\%, \rho_d = 1.52 \text{ g/cm}^3,$$

$$\alpha_0 = 0^\circ, \eta_0 = 0.43, b_0 = 0.5, p_0 = 100 \text{ kPa}$$

Fig. 5 Dynamic pore air pressure with time change curve

由图5可以看出,孔隙气压力在前期缓慢增加,在历时约100 s(该试样在  $t = 100 \text{ s}$  时对应的动剪应变  $\gamma_d = 1.8\%$ )之后,孔隙中的气压力开始急剧增加,这一结果和骆亚生<sup>[13]</sup>、胡仲有<sup>[14]</sup>对非饱和和黄土动孔隙气压力的测试结果较为一致。Asaoka等<sup>[15]</sup>曾指出,在不排水条件下,当试样存在初始缺陷时,这些缺陷会在开始剪切带阶段诱发孔隙水的迁移。Brand等<sup>[16]</sup>在《Soft Clay Engineering》中指出,在不排水试验中产生的孔隙水压力是受压土的体积应变特性影响的,可以用孔隙水压力的急剧增长变化来表明一种屈服条件。对于非饱和和黄土,由于其本身

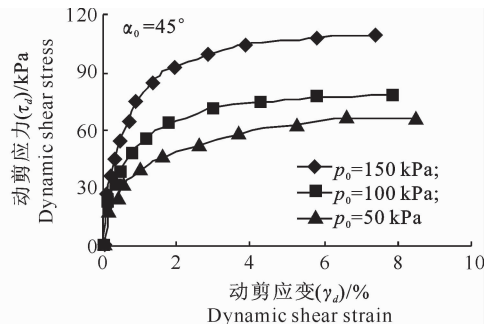


图4 不同初始平均主应力下的动本构关系曲线

Fig. 4 Dynamic constitutive relationship curves under different initial average principal stresses

的大孔隙柱状节理结构,加之土中的各种缺陷,在加载初期,土体结构的变化使孔隙中的气体受压开始不均匀迁移,这时的孔隙气压力值较小,当迁移达到一个新的平衡时,随着外荷载的增加,孔隙气压力开始增大,在有缺陷区域由于应力集中将开始屈服,当孔隙气压力超过了土体颗粒之间的黏结力,颗粒逐渐被分开,缺陷区土体孔隙逐步变大,微观或宏观剪切带开始出现并发展。通过以上分析可以得出,对于动荷载下的非饱和黄土,用动孔隙气压力增长的转折点来判断局部化变形和剪切带的出现是合理的。

### 2.4 阻尼比

阻尼比  $\lambda$  是描述土动力特性的一个重要参数,它反映了波在土体传播过程中由于土体内部摩擦等阻抗因素的影响而产生的损失程度,是衡量土体吸收动荷载能量的尺度。一般采用文献[12]的方法计算。

对于土体阻尼比的测试,由于受测试手段的限制,以往认为阻尼比的规律不够明显,事实上阻尼比必然随着加载过程中土体的变形、屈服而呈现出一定的规律性。骆亚生<sup>[13]</sup>通过分析以往试验得到的阻尼比规律不明显的原因,提出用动扭剪仪进行阻尼比试验是可行的。虞海珍<sup>[17]</sup>通过动扭剪仪分别获得了饱和钙质砂和黄土的阻尼比随动剪应变变化的非线性规律。本次试验得到阻尼比随动剪应变变化的规律如图6所示。

由图6可以看出,当  $\alpha_0 = 0^\circ$ ,即无初始预剪应力时,阻尼比随着动剪应变缓慢增加至  $\gamma_d = 2\%$  时,出现了转折点,说明土样中此时出现了塑性区,即宏观或者微观剪切带开始出现。当  $\alpha_0 = 45^\circ$ ,即在初始静预剪应力存在时,土样的阻尼比随着动剪应变的增

大先减小后增大,产生这种现象的原因是初始静预剪应力使土样土粒间颗粒接触点减小,增加了能量在土体中传播时的消耗,之后由于试样振动压密,孔隙率减小,颗粒之间的接触点重新恢复甚至增加,波的传递性能有所恢复,阻尼比变小;随着动剪应变的继续增大,至  $\gamma_d=2.8\%$  时,曲线的斜率出现转折点,这是由于随着动剪应力的增加和动剪应变的增大,土体某些区域出现了塑性区,剪切带开始出现,

这些塑性区吸收波的能量作用变强,使得土体的阻尼比再次增大。

由阻尼比的定义和试验结果可以得出,用阻尼比来判断局部化变形的出现和发展,意义明确而且可靠,如果能够准确得出土样在动荷载作用下阻尼比的变化规律,就能够准确判别土样中局部化变形的开始和发展。综上所述,在动荷载作用下的局部化变形研究中,阻尼比的研究不可或缺。

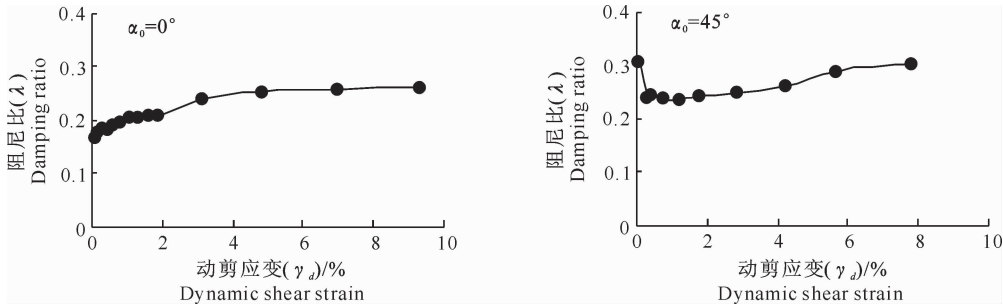


图 6 黄土阻尼比随动剪应变的变化曲线  
 $w=19\%, \rho_d=1.52\text{ g/cm}^3, \eta_0=0.43, b_0=0.5, p_0=100\text{ kPa}$   
Fig. 6 Curves of damping ratio with dynamic shear strain change

### 3 剪切带倾角分析

#### 3.1 土样破坏形态分析

试验中发现,在大部分试验后的试样上能够看

到明显的剪切带,剪切带的形态皆为单一未贯穿应力边界面曲面的带状破坏形态,剪切带有一定的厚度,但是并不均匀,剪切面也不光滑;剪切带在试样上的位置不定,有的偏上,有的偏下,如图 7 所示。

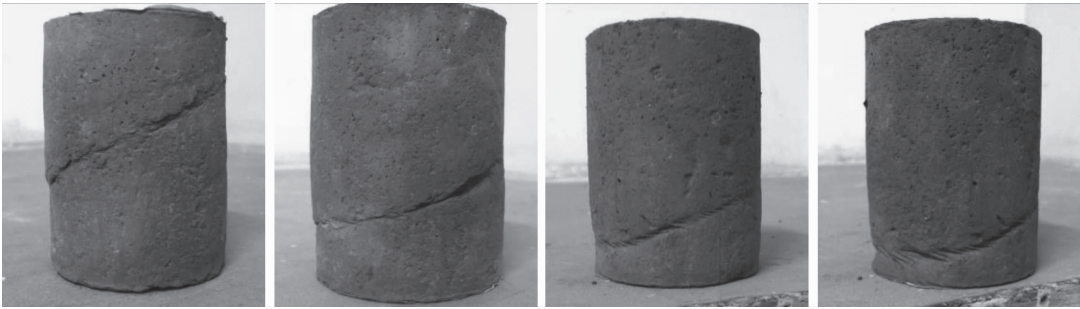


图 7 有剪切带试样的破坏形态  
Fig. 7 Failure mode of specimen with shear band

#### 3.2 初始平均主应力和初始主应力方向角对剪切带倾角的影响

本次试验过程中发现,75%的试样在试验结束时都出现了明显的剪切带,描述剪切带的 2 个特征指标就是剪切带的倾角和厚度,对于厚度在宏观上很难确定,一般认为和土粒粒径有关,对于剪切带的倾角,量测得到的结果如表 3 所示。

从表 3 可以看出,在复杂初始应力状态的动荷载作用下,土样的剪切带倾角随着初始平均主应力

增加,在初始主应力方向角  $<45^\circ$  时呈增加趋势,在初始主应力方向角  $\geq 45^\circ$  时又呈减小趋势。在初始主应力方向角  $<45^\circ$  时,剪切带倾角随着初始主应力方向角的增大而减小;当初始主应力方向角为  $90^\circ$  时,土样未出现剪切带,原因是此时的最大剪应力面为水平面,也即理论上的剪切带倾角应该为  $0^\circ$ ,考虑剪切过程中主应力轴的偏转,则剪切带倾角应该接近  $0^\circ$ 。根据所测得的剪切带倾角大小,推断在动荷载作用下无法用 M-C 理论对其进行预测。

表 3 不同初始应力状态下土样的剪切带倾角

| Table 3 Angle of shear band in specimen under different initial stress state parameters (°) |                                                      |                                  |                            |                                                      |                                  |                            |                                                      |                                  |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|----------------------------------|----------------------------|------------------------------------------------------|----------------------------------|----------------------------|------------------------------------------------------|----------------------------------|
| 试样编号<br>Specimen<br>number                                                                  | 初始主应力<br>方向角<br>Initial angle of<br>principal stress | 剪切带<br>倾角<br>Shear band<br>angle | 试样编号<br>Specimen<br>number | 初始主应力<br>方向角<br>Initial angle of<br>principal stress | 剪切带<br>倾角<br>Shear band<br>angle | 试样编号<br>Specimen<br>number | 初始主应力<br>方向角<br>Initial angle of<br>principal stress | 剪切带<br>倾角<br>Shear band<br>angle |
| YZ-50-0                                                                                     | 0                                                    | 20                               | YZ-100-0                   | 0                                                    | 30                               | YZ-150-0                   | 0                                                    | 35                               |
| YZ-50-30                                                                                    | 30                                                   | —                                | YZ-100-30                  | 30                                                   | 14                               | YZ-150-30                  | 30                                                   | 25                               |
| YZ-50-45                                                                                    | 45                                                   | 30                               | YZ-100-45                  | 45                                                   | 20                               | YZ-150-45                  | 45                                                   | 20                               |
| YZ-50-60                                                                                    | 60                                                   | 25                               | YZ-100-60                  | 60                                                   | 20                               | YZ-150-60                  | 60                                                   | —                                |
| YZ-50-90                                                                                    | 90                                                   | —                                | YZ-100-90                  | 90                                                   | —                                | YZ-150-90                  | 90                                                   | —                                |

注:表中试样编号中,YZ 表示原状土样,中间数值表示初始平均主应力,末尾数值表示初始主应力方向角。  
Note:“YZ” in the specimen numbers in the table means undisturbed soil sample,the middle number in the specimen numbers in the table means initial average principal stresses,the last number in the specimen numbers in the table means initial angle of principal stress.

4 结 论

(1)本次研究发现,在动荷载作用下黄土剪切试验时 75%试样出现了明显的剪切带,说明在动荷载作用下非饱和黄土会出现局部化变形。

(2)通过动本构关系研究,证明土体的软化特性和局部化变形之间没有必然的关系,也说明了用 Hardin-Drnevich 双曲线模型描述陕西杨凌非饱和黄土的动本构关系是合理的。

(3)用动孔隙气压力和阻尼比的变化规律来判别非饱和黄土局部化变形的出现和发展,意义明确、且合理可行。

(4)在复杂初始应力状态的动荷载作用下,土样的剪切带倾角随着初始平均主应力增加,在初始主应力方向角<45°时表现出增加趋势,在初始主应力方向角≥45°时又呈减小趋势。在初始主应力方向角<45°时,剪切带倾角随着初始主应力方向角的增大而减小;当初始主应力方向角为 90°时,土样未出现剪切带,推断在动荷载作用下的剪切带倾角无法用 M-C 理论进行预测。

[参考文献]

[1] 王兰民,石玉成,刘 旭,等.黄土动力学 [M].北京:地震出版社,2003.  
Wang L M,Shi Y C,Liu X,et al. Loess dynamics [M]. Beijing: Earthquake Press,2003. (in Chinese)

[2] 蔡正银,李相崧.无黏性土中剪切带的形成过程 [J].岩土工程学报,2003,25(2):129-134.  
Cai Z Y,Li X S. Formation of shear band in cohesionless soils [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2003,25(2): 129-134. (in Chinese)

[3] 赵锡宏,张启辉.土的剪切带试验与数值分析 [M].北京:机械工业出版社,2002.  
Zhao X H,Zhang Q H. Test and numerical analysis of shear bands in soil [M]. Beijing: Mechanical Industry Press,2002. (in Chinese)

[4] 徐连民,王天竹,祁德庆,等.岩土中的剪切带局部化问题研究:回顾与展望 [J].力学季刊,2004,25(4):484-488.  
Xu L M,Wang T Z,Qi D Q,et al. Study on geotechnical shear band localization:Retrospect and prospect [J]. Chinese Quarterly of Mechanics,2004,25(4):484-488. (in Chinese)

[5] Finno R J,Harris W W,Mooney M A,et al. Shear bands in plane strain compression of loose sand [J]. Geotechnique,1997,47:149-165.

[6] 董建国,李 蓓,袁聚云,等.上海浅层褐黄色粉质粘土剪切带形成试验研究 [J].岩土工程学报,2001,23(1):23-27.  
Dong J G,Li B,Yuan J Y,et al. Study of test on the formation of shear bands in Shanghai yellowish dark brown silty clay [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2001,23(1):23-27. (in Chinese)

[7] 李 蓓,赵锡宏,董建国.上海粘性土局部化变形的平面应变试验研究 [J].地下空间,2003,23(1):48-51.  
Li B,Zhao X H,Dong J G. An experimental study on plane strain compression tests of localized deformation in Shanghai clay [J]. Underground Space,2003,23(1):48-51. (in Chinese)

[8] 蒋 刚,李苏春.南京粉土与粉质黏土剪切带三轴试验与性状分析 [J].南京工业大学学报:自然科学版,2008,35(5):7-11.  
Jiang G,Li S C. Performance analysis on shear band under tri-axial test of silt and silty clay in Nanjing [J]. Journal of Nan-jing University of Technology: Natural Science Edition,2008,35(5):7-11. (in Chinese)

[9] 喻兼临,孙 逊,于玉贞,等.结构性土中剪切带扩展实验研究 [J].清华大学学报:自然科学版,2010,50(3):367-371.  
Yu J L,Sun X,Yu Y Z,et al. Experimental study of the evolu-tion of shear bands in structured soil [J]. Journal of Tsinghua University: Natural Science Edition,2010,50(3):367-371. (in Chinese)

[10] 杨利国,骆亚生,李 焱,等.初始应力条件对压实黄土动强度影响的研究 [J].岩土力学,2010,31(1):87-91.  
Yang L G,Luo Y S,Li Y,et al. Research on effect of initial stress conditions on dynamic strength of compacted loess [J]. Rock and Soil Mechanics,2010,31(1):87-91. (in Chinese)

[11] 付 磊,王洪瑾,周景星.主应力偏角对砂砾料动力特性影响的试验研究 [J].岩土工程学报,2000,22(4):435-440.

Fu L, Wang H J, Zhou J X. Effect of the initial rotation angle of principal stress on the dynamic properties of soil [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, 22(4): 435-440. (in Chinese)

[12] 谢定义. 土动力学 [M]. 陕西西安: 西安交通大学出版社, 1988.

Xie D Y. Soil dynamics [M]. Xi'an, Shaanxi: Xi'an Jiaotong University Press, 1988. (in Chinese)

[13] 骆亚生. 非饱和黄土在动、静复杂应力条件下的结构变化特性及结构性本构关系研究 [D]. 陕西西安: 西安理工大学, 2003.

Luo Y S. Variation characteristics of soil structure and structural constitutive relation of unsaturated loess under static and dynamic complex stress conditions [D]. Xi'an, Shaanxi: Xi'an University of Technology, 2003. (in Chinese)

[14] 胡仲有. 不同地区黄土动力特性及其结构性研究 [D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2008.

Hu Z Y. Study on dynamic behavior and structure characteristics of loess in different areas [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2008. (in Chinese)

[15] Asaoka A, Noda T. Imperfection-sensitive bifurcation of cam-clay under plain strain compression with undrained boundaries [J]. Soils and Foundations, 1995, 35(1): 83-100.

[16] Brand E W, Brenner R P. 软粘土工程学 [M]. 叶书麟, 宰金璋, 校译. 北京: 中国铁道出版社, 1991.

Brand E W, Brenner R P. Soft clay engineering [M]. Ye S L, Zai J Z, translate. Beijing: China Railway Publishing House Press, 1991. (in Chinese)

[17] 虞海珍. 复杂应力条件下饱和钙质砂动力特性的试验研究 [D]. 湖北武汉: 华中科技大学, 2006.

Yu H Z. Experimental research on dynamic behavior of saturated calcareous sand under complex stress conditions [D]. Wuhan, Hubei: Huazhong University of Science and Technology, 2006. (in Chinese)

(上接第 226 页)

[15] 竹内洋一郎. 热应力 [M]. 郭廷玮, 李安定, 译. 北京: 科学出版社, 1977: 248-250.

Takeuchi Yoichiro. Thermal stress [M]. Guo T W, Li A D, translate. Beijing: Science Press, 1977: 248-250. (in Chinese)

[16] 朱伯芳. 有限单元法原理与应用 [M]. 2 版. 北京: 中国水利水电出版社, 1998: 270-287.

Zhu B F. The finite element method theory and applications [M]. 2nd ed. Beijing: China Water Power Press, 1998: 270-287. (in Chinese)

[17] 徐 彬, 闫 娜, 李 宁, 等. 温降对液化石油气储库围岩裂隙开裂影响的数值分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(4): 718-726.

Xu B, Yan N, Li N, et al. Numerical analysis of effect of temperature decreasing on crack of chilled LPG unlined storage cavern [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(4): 718-726. (in Chinese)

[18] 水利水电规划设计总院. 水利水电工程地下建筑物设计手册 [M]. 四川成都: 四川科学技术出版社, 1993.

Water Resources and Hydropower Planning and Design Code. Design manual of water resources and hydropower engineering underground structures [M]. Chengdu, Sichuan: Sichuan Science and Technology Press, 1993. (in Chinese)

[19] 中华人民共和国水利部. DL/T 5057—2009 水工混凝土结构设计规范 [S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2009.

Ministry of Water Resources. DL/T 5057—2009 Design code for hydraulic concrete structures [S]. Beijing: China Water Power Press, 2009. (in Chinese)

[20] 许锡昌, 刘泉声. 高温下花岗岩基本力学性质初步研究 [J]. 岩土工程学报, 2000, 22(3): 332-335.

Xu X C, Liu Q S. A preliminary study on basic mechanical properties for granite at high temperature [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, 22(3): 332-335. (in Chinese)