

DOI: 10.16285/j.rsm.2022.0447

# 平面应变下原状黄土的剪切带研究

赵 凯<sup>1</sup>, 邵 帅<sup>1,2</sup>, 邵生俊<sup>1,2</sup>, 魏军政<sup>3</sup>, 张少英<sup>1</sup>, 张 玉<sup>4</sup>

(1. 西安理工大学 岩土工程研究所, 陕西 西安 710048; 2. 西安理工大学 陕西省黄土力学与工程重点实验室, 陕西 西安 710048;  
3. 中铁第一勘察设计院集团有限公司, 陕西 西安 710043; 4. 西安工业大学 建筑工程学院, 陕西 西安 710021)

**摘 要:** 针对黄土地区工程建设中的平面应变问题, 使用改进的西安理工大学真三轴仪进行了不同侧向固结压力、不同含水率下原状黄土的平面应变剪切试验, 得出了剪切破坏时剪切带倾角试验值, 根据应力-应变关系曲线求出了剪切带倾角的 Mohr-Coulomb、Roscoe 理论解, 分析了相应控制因素下原状黄土强度、剪切带破坏模式与倾角的变化。结果表明: 应力-应变曲线随含水率、侧向固结压力的增大从原生软化型向次生硬化型转变; 剪切带破坏模式随侧向固结压力的增大依次呈现单一剪切带、锥型剪切带和 X 型剪切带; 随着含水率的增大, 黏聚力、内摩擦角减小导致 Mohr-Coulomb 剪切带倾角减小, 剪胀作用增强导致 Roscoe 剪切带倾角增大; 随侧向固结压力增大, 动内摩擦角增大及剪胀作用增强, 导致 Mohr-Coulomb、Roscoe 剪切带倾角增大。

**关 键 词:** 平面应变试验; 黄土; 应力-应变关系; Mohr-Coulomb 剪切带; Roscoe 剪切带

中图分类号: TU 444

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2023) 02-0433-09

## Study on shear bands of undisturbed loess under plane strain

ZHAO Kai<sup>1</sup>, SHAO Shuai<sup>1,2</sup>, SHAO Sheng-jun<sup>1,2</sup>, WEI Jun-zheng<sup>3</sup>,  
ZHANG Shao-ying<sup>1</sup>, ZHANG Yu<sup>4</sup>

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China;

2. Shaanxi Key Laboratory of Loess Mechanics and Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China;

3. China Railway First Survey and Design Institute Group Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710043, China;

4. Civil and Architecture Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an, Shaanxi 710021, China)

**Abstract:** For the plane strain problem of engineering construction in loess area, the plane strain shear tests on intact loess under different lateral consolidation pressures and moisture contents were carried out by using the transformational true triaxial apparatus of Xi'an University of Technology. The experimental measurements of angle of inclination for shear band at shear failure were obtained. The Mohr-Coulomb and Roscoe solutions to angle of inclination for shear band of were derived from the stress-strain curve. The changes of intact loess strength, failure mode and angle of inclination for shear band were analyzed. The study results show that the stress-strain curve vary from primary softening type to secondary hardening type with the development of new structure when the water content and lateral consolidation pressure increase. The failure modes of shear band present single line-shaped, cone-shaped and X-shaped as the increase of lateral consolidation pressure. Along with the increase of moisture content, decrease in the cohesion, internal friction angle leads to reduce the angle of inclination for shear band of Mohr-coulomb solution, while the enhanced dilatancy rising the Roscoe solution. With the increase of lateral consolidation pressure, both the dynamic internal friction angle and the dilatancy are increase, resulting in shear band inclination angles of Mohr-Coulomb and Roscoe solution increase.

**Keywords:** plane strain test; loess; stress-strain relationship; Mohr-Coulomb shear band; Roscoe shear band

收稿日期: 2022-04-06

录用日期: 2022-05-13

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 52108342); 陕西省自然科学基金基础研究计划-引汉济渭联合基金项目 (No. 2019JLP-21, No. 2019JLZ-13); 西安理工大学博士启动金 (No. 107-451122001); 陕西省水利科技计划项目 (No. 432021019)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (52108342), the Basic Research Program of Natural Science in Shaanxi Province-Han-Wei Joint Found Project (2019JLP-21, 2019JLZ-13), the Doctoral Initial Funding of Xi'an University of Technology (107-451122001) and the Shaanxi Water Science and Technology Program Project (432021019).

第一作者简介: 赵凯, 男, 1997 年生, 硕士研究生, 主要从事黄土力学与工程方面的研究。E-mail: zhaokai199711@163.com

通讯作者: 邵帅, 男, 1991 年生, 博士, 讲师, 从事土动力学与黄土力学等方面的研究。E-mail: shaoshuai@xaut.edu.cn

## 1 引言

黄土在地球表面广泛分布,在我国西北地区黄土地层最厚、最完整、发育好、地层全、分布连续,其特性较经典<sup>[1]</sup>。在黄土地区的基础设施建设中涉及了大量的黄土工程问题,其中大部分工程处于平面应变状态,譬如,道路地基、挡土墙、隧道围岩及边坡的稳定问题。由于平面应变剪切作用下原状黄土试样比常规三轴试样具有更高的强度和更小的破坏应变,因此,平面应变条件下土体更容易产生裂缝,导致土体失稳或开裂,且比常规三轴压缩条件下更快地发生破坏。Khalid 等<sup>[2]</sup>通过砂土的平面应变试验,研究了试样密度、侧压和砂粒结构对不同粒径砂的应力-应变关系及剪切带倾角的影响。比较了试验测试剪切带倾角与 Mohr-Coulomb<sup>[3]</sup>、Roscoe<sup>[4]</sup>、Arthur<sup>[5]</sup>等剪切带倾角的差异。邵生俊等<sup>[6-7]</sup>通过真三轴试验对原状结构性黄土的强度及剪切空间滑动面进行分析,研究发现真三轴压缩原状黄土具有明显的剪切带,较小侧压和中主应力条件下表现为软化,较大侧压和中主应力条件下表现为硬化。中主应变、体应变与大主应变关系曲线较为一致的转折点反映了土变形性状发生变化;中主应力作用平面上剪切带两侧的土结构块体产生相对滑移,剪切带开始形成和发展。张玉等<sup>[8-11]</sup>通过改进的西安理工大学真三轴仪,进行了平面应变下原状黄土的强度及变形特性等方面的研究。在低固结侧压条件下,发现低含水率原状黄土剪切过程呈原生结构损伤软化型,随着固结侧压增大,呈次生结构形成硬化型。平面应变剪切破坏时的中主应力系数介于 0.15~0.35 之间。由于平面应变下不同含水率、不同侧压对原状黄土的黏聚力、内摩擦角、剪切破坏时的大小主应力及主应力方向的塑性应变有影响, Mohr-Coulomb 和 Roscoe 剪切带倾角也会随之发生变化。因此,分析原状黄土平面应变试验剪切带的影响因素显得非常必要。本文利用改进真三轴仪,进行平面应变条件下原状黄土的剪切破坏时剪切带研究。

## 2 试验方案

### 2.1 试验材料及制备

试验所用原状黄土样取自西安市白鹿塬天然陡坎处,取土深度约为 7 m。为保证试验土样含水率的均匀性,在天然陡坎处水平向坡内人工挖掘约 2~3 m 开始取土,取成长方块状。为防止土样风干,采用黑色塑料薄膜包裹土块,并用胶带纸裹紧,

最后装箱运回实验室。采取土样应避免碎石、钙质结核、蚂蚁、树根等影响试验结果的杂物。土样为粉质黏土,属 Q<sub>3</sub> 黄土。为保证原状土样完整性,用原状样制样器切削制备试样,制作过程中应尽量避免对土原状结构的扰动。试样尺寸为 7 cm×7 cm×14 cm。原状黄土的基本物理性质指标见表 1。

表 1 白鹿塬黄土的主要物理性质指标  
Table 1 Main physical properties of loess in Bailuyuan

| 土粒相对<br>密度 $G_s$ | 天然<br>含水率<br>$w/\%$ | 干密度 $\rho_d$<br>$/(g \cdot cm^{-3})$ | 液限 $w_L$<br>$\%$ | 塑限 $w_p$<br>$\%$ | 塑性<br>指数<br>$I_p$ | 初始<br>孔隙比<br>$e_0$ |
|------------------|---------------------|--------------------------------------|------------------|------------------|-------------------|--------------------|
| 2.70             | 15.8                | 1.46                                 | 32.8             | 21.6             | 11.2              | 0.80               |

对原状黄土进行不同含水率(9%、13%、17%、21%、24%)及不同侧向固结压力  $\sigma_{3c}$  (50、100、200、300 kPa) 的平面应变试验。采用风干和滴定等方法得到不同含水率的黄土试样。为保证黄土试样中的水分能充分均匀地扩散,在保湿缸中静置 24 h 以上再进行试验。

平面应变试验仪器采用西安理工大学研制的真三轴仪<sup>[12]</sup>,经改造后进行,实现平面应变条件下对土体强度特征、变形特性及剪切滑动面形状的试验研究。试验设备具体参考文献<sup>[8]</sup>。

### 2.2 试验方案

针对不同含水率的原状黄土进行试验时,试验过程中保持  $\sigma_2$  方向应变始终为 0,在竖向和侧向施加固结应力  $\sigma_{3c}$ 。完成固结后,保持侧向压力  $\sigma_{3c}$  不变,进行竖向加载的排水剪切试验,控制竖向荷载,测量加载过程中大小主应力方向的应力和变形的变化,进行平面应变试验研究。本试验以天然沉积面作为竖向大主应力  $\sigma_1$  的加载面,模拟土体竖向加载作用。加载剪切过程由应变速率控制,计算机以 5 s 为间隔自动采集应力、应变数据。设定竖向压缩应变  $\varepsilon_1$  达到 15% 时,土样发生完全剪切破坏。整个剪切过程历时 6 h 左右,依据采集数据得到相应的应力-应变关系曲线。待试样加载剪切破坏后,取出土样,对实际破坏试样进行拍照,并对剪切带实际破坏形状进行数据点采集。对数据点进行线性拟合,确定出平面应变试样的剪切带倾角。

## 3 平面应变下原状黄土应力-应变分析

### 3.1 原状黄土的应力-应变关系

依据不同含水率原状黄土试验过程中采集的大、小主应力  $\sigma_1$ 、 $\sigma_3$  和大、小主应变  $\varepsilon_1$ 、 $\varepsilon_3$  数据,得到不同侧压下主应力比  $\sigma_1/\sigma_3$  与大主应变  $\varepsilon_1$  之

间的关系曲线以及体应变  $\varepsilon_v$  与大主应变  $\varepsilon_1$  之间的关系曲线。

含水率分别为 9%、13%、17%、21%、24% 的

原状黄土试样在不同侧压 (50、100、200、300 kPa) 下的大主应变  $\varepsilon_1$  与主应力比  $\sigma_1/\sigma_3$  之间的关系曲线如图 1、2 所示。

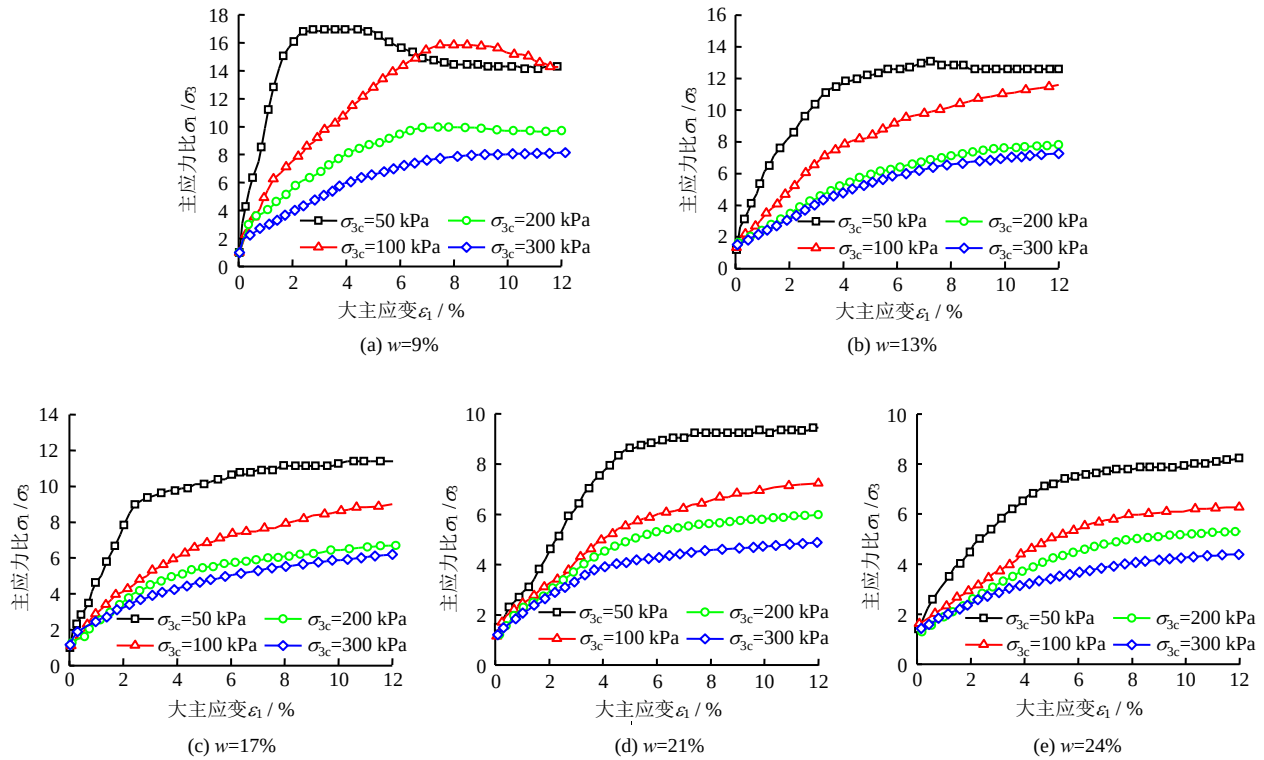


图 1 原状黄土相同含水率、不同侧压的  $\sigma_1/\sigma_3 - \varepsilon_1$  关系曲线

Fig.1  $\sigma_1/\sigma_3 - \varepsilon_1$  curves of intact loess under different lateral pressures with the same water content

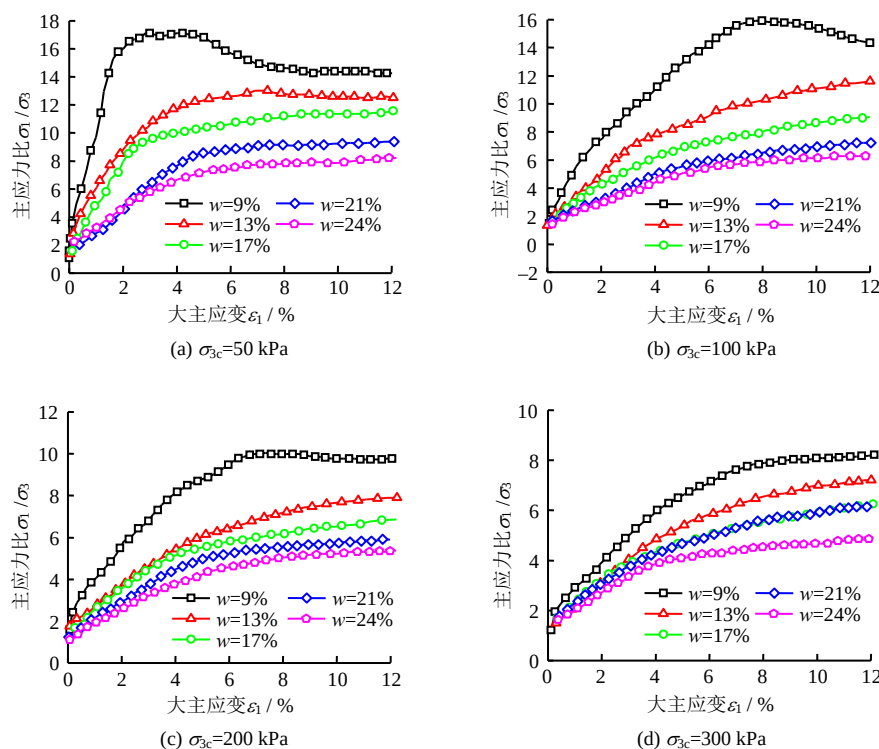


图 2 原状黄土相同侧压、不同含水率的  $\sigma_1/\sigma_3 - \varepsilon_1$  关系曲线

Fig.2  $\sigma_1/\sigma_3 - \varepsilon_1$  curves of intact loess with different water contents under the same lateral pressure

### 3.1.1 侧压对主应力比与大主应变关系的影响

由图1中相同含水率、不同侧压的 $\sigma_1/\sigma_3 - \varepsilon_1$ 关系曲线可见,在含水率为9%,侧压分别为50、100、200 kPa和含水率为13%、侧压为50 kPa条件下,试样呈应变软化型。由于低含水率、低侧压条件下原状黄土的原生结构未遭到破坏,加载剪切时,黄土原生结构遭到破坏,使得主应力比与大主应变关系曲线呈现软化现象。破坏峰值强度后的软化表示滑移机制整体响应开始产生<sup>[2]</sup>。随着试样不断剪切变形,软化变得更加显著。随着含水率和侧向固结压力增大,固结压缩作用引起原状黄土的初始结构被破坏,在加载剪切过程中,弱结构性黄土的次生结构形成强于原生结构的破坏,使得土从应变软化向硬化转化。

在相同含水率下,随着侧压的增大,黄土的结构强度增强, $\sigma_1/\sigma_3 - \varepsilon_1$ 曲线的初始切线斜率越小,达到破坏后的主应力比值越小。随着大主应变 $\varepsilon_1$ 不断发展,曲线的切线斜率逐渐减小,主应力比值逐渐趋于稳定。在主应力比不再增大时,认为土样已经发生剪切破坏。

### 3.1.2 含水率对主应力比与大主应变关系的响应

由图2中相同侧压、不同含水率下 $\sigma_1/\sigma_3 - \varepsilon_1$ 关系曲线可见,在加载过程中,原状黄土在含水率为9%,侧向固结压力分别为50、100、200 kPa以及含水率为13%、侧压为50 kPa条件下,主应力比与

大主应变关系呈软化型,其余呈硬化型。

相同侧向固结压力下,含水率越大,初始切线斜率越小,大主应力比峰值或最大值越小,黄土的强度越低。因此,含水率增长对原状黄土强度有软化作用,含水率越大,软化作用越明显。图1、2表明,含水率和侧向固结压力是影响原状黄土强度的主要因素。

### 3.2 黄土的体应变特性

图3为相同含水率、不同侧压下原状黄土体应变 $\varepsilon_v$ 与大主应变 $\varepsilon_1$ 关系曲线。由图可知,低含水率(9%)、低侧压(50、100 kPa)以及含水率为13%、低侧压(50 kPa)条件下,黄土的体应变 $\varepsilon_v$ 随大主应变 $\varepsilon_1$ 变化出现峰值,体应变峰值处的大主应变 $\varepsilon_1$ 与图1中相同含水率和侧压下峰值主应力比对应的大主应变 $\varepsilon_1$ 值相同。图1和图3中峰值后原状黄土的剪切带开始形成,产生剪切滑移。峰值之前表现为剪缩性状,峰值之后表现为剪胀性状。这是原状黄土低含水率、较低侧压下强结构性导致的结果。较高含水率和侧压条件下土结构性弱化,剪切过程均表现为剪缩。

### 3.3 黄土的侧向变形分析

图4为相同含水率、不同侧压下大主应变 $\varepsilon_1$ 与小主应变 $\varepsilon_3$ 关系曲线。由图可知,当 $\varepsilon_1$ 小于2%时,侧向应变几乎没有发展;当 $\varepsilon_1$ 为2%~4%时,曲线呈抛物线型增长;当 $\varepsilon_1$ 大于4%时,近似呈线性增

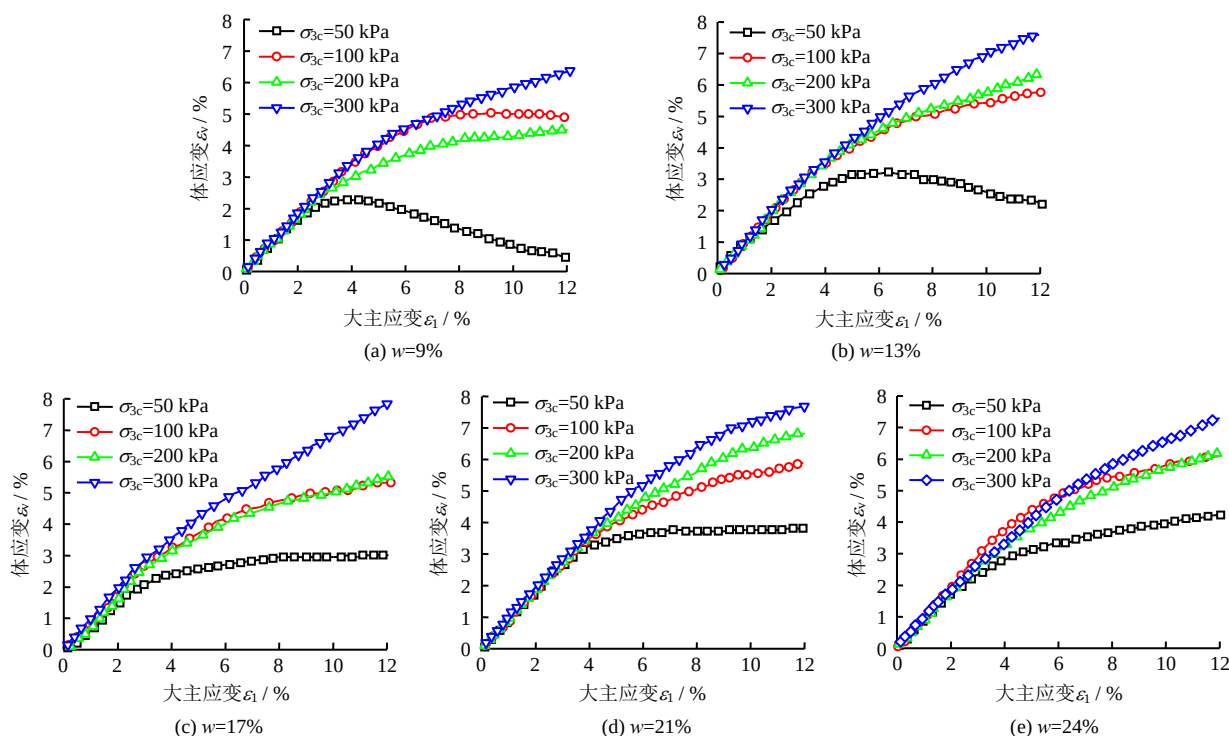
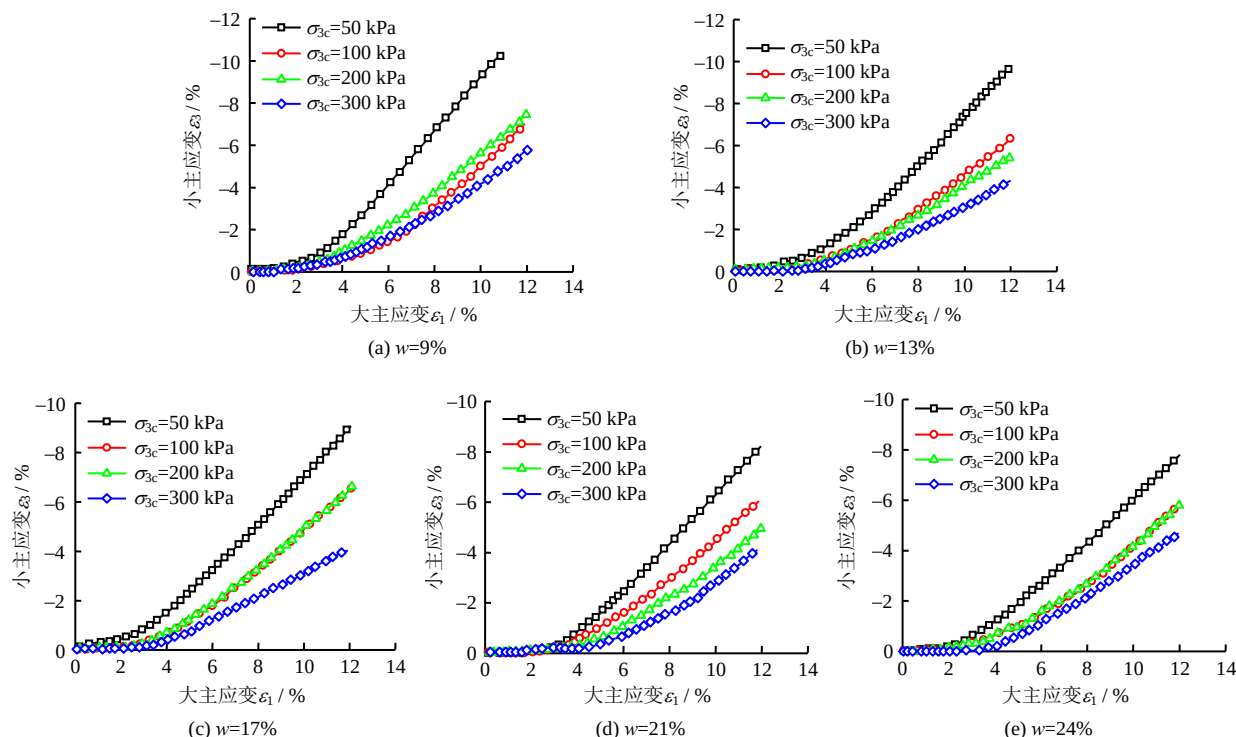


图3 原状黄土相同含水率、不同侧压的 $\varepsilon_v - \varepsilon_1$ 关系曲线

Fig.3  $\varepsilon_v - \varepsilon_1$  curves of intact loess under different lateral pressures with the same water content

图4 原状黄土相同含水率、不同侧压的  $\varepsilon_3 - \varepsilon_1$  关系曲线Fig.4  $\varepsilon_3 - \varepsilon_1$  curves of intact loess under different lateral pressures with the same water content

长。相同大主应变条件下，侧压越大，小主应变越小。相同侧压条件下，随含水率的增大，小主应变与大主应变曲线的斜率越小。因此，相同侧压、相同大主应变处，小主应变随含水率的增大而减小。

## 4 黄土的平面应变剪切带倾角分析

### 4.1 剪切带倾角

#### 4.1.1 Mohr-Coulomb 剪切带倾角

依据 Mohr-Coulomb 准则<sup>[3]</sup>，剪切带的倾角公式为

$$\theta_c = 45^\circ + \frac{\varphi_m}{2} \quad (1)$$

式中： $\theta_c$  为剪切带与小主应力  $\sigma_3$  方向之间的夹角； $\varphi_m$  为动内摩擦角，是一个静态本构参数。

对于黏性土：

$$\varphi_m = \arcsin \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 + \sigma_3 + 2c \cot \varphi} \quad (2)$$

式中： $c$  和  $\varphi$  为平面应变试验测得的不同含水率黄土的强度指标<sup>[13]</sup>，如图5、6所示。

图5、6为原状黄土黏聚力、内摩擦角随含水率的变化曲线。由图可以看出，黏聚力随含水率变化较大，随着含水率的增大而减小，含水率约达20%时黏聚力趋于稳定值；内摩擦角随含水率的增大而减小，变化趋势不明显。式(2)中的  $\sigma_1$  和  $\sigma_3$  由图1中的不同含水率的主应力比与大主应变关系曲线确

定。图1中出现软化现象的，以峰值时的应力比值确定  $\sigma_1$  和  $\sigma_3$ ，其余以土达到破坏应变对应的主应力比值确定  $\sigma_1$  和  $\sigma_3$ 。

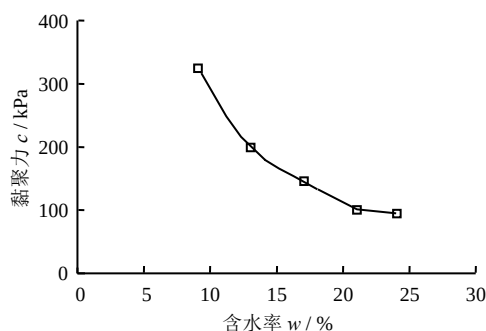


图5 黏聚力-含水率关系曲线

Fig.5 Relationship between cohesion and water content

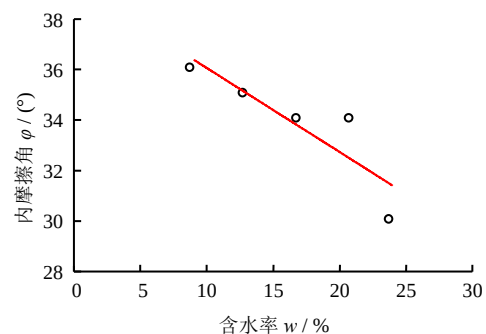


图6 内摩擦角-含水率关系曲线

Fig.6 Relationship between internal friction angle and water content

#### 4.1.2 Roscoe 剪切带倾角

Roscoe<sup>[4]</sup>提出剪切带的倾角更接近于最大应变倾角, 即

$$\theta_R = 45^\circ + \frac{\psi_f}{2} \quad (3)$$

式中:  $\theta_R$  为剪切带与小主应变增量  $d\varepsilon_3$  方向的夹角;  $\psi_f$  为破裂时的剪胀角, 计算式为

$$\psi_f = \arcsin \frac{d\varepsilon_v^p}{d\varepsilon_y^p} = \arcsin \frac{d\varepsilon_1^p + d\varepsilon_3^p}{d\varepsilon_1^p - d\varepsilon_3^p} \quad (4)$$

式中:  $\varepsilon_v^p$  和  $\varepsilon_y^p$  分别为塑性体应变和塑性剪应变;  $\varepsilon_1^p$  和  $\varepsilon_3^p$  分别为竖向塑性主应变和侧向塑性主应变。在平面应变试验中, 主应力比与大主应变曲线出现峰值时, 开始产生滑动面滑移机制; 其余为主应力比与大主应变关系曲线趋于稳定值。  $d\varepsilon_1^p$  和  $d\varepsilon_3^p$  取图 4 中不同含水率、不同侧压下  $\varepsilon_3 - \varepsilon_1$  曲线中破坏应变对应的  $\varepsilon_3$  和  $\varepsilon_1$  的微分。

#### 4.1.3 Arthur 剪切带倾角

Arthur 等<sup>[5]</sup>提出以下剪切带倾角公式:

$$\theta_A = 45^\circ + \frac{1}{4}(\varphi_m + \psi_f) = \frac{1}{2}(\theta_c + \theta_R) \quad (5)$$

在关联塑性情况下, 最大应力倾角平面的方向与零延伸方向重合, 因此 Mohr-Coulomb 滑动面与 Roscoe 滑动面重合, 该解为 Mohr-Coulomb 滑动面倾角或 Roscoe 滑动面倾角。但陕西黄土属粉质黏土, 土颗粒较粗, 不考虑这种情况。

#### 4.2 剪切带倾角试验实测值

对含水率为 17% 的原状黄土进行侧压 50、100、200、300 kPa 下的平面应变试验, 如图 7 所示, 破坏土样出现了较明显的剪切带。剪切面与平面应变面正交, 黄土在不同侧压下平面应变剪切破坏模式比砂土的 X 型分叉失稳复杂。

利用 Origin 软件对破坏土样的剪切带形状进行数据点的采集并进行线性拟合, 拟合曲线的倾角即为剪切带的倾角。图 7 为含水率 17%、不同侧压下的剪切带倾角实测值。图中标识依次为土样采集的破坏点、拟合曲线、计算得到的曲线斜率  $k$  和拟合决定系数  $R^2$ 。

在低侧压 (50、100 kPa) 时, 剪切破坏如图 7 中土样 1、2 所示, 呈单一剪切带破坏, 在平面应变面上产生倾斜剪切面。在侧压为 200 kPa 时, 剪切破坏为土样 3、土样 4 所示, 呈锥型剪切带破坏, 由试样的上边界向下产生两条斜裂缝, 形成 V 型破坏面; 上边界端部形成锥形体, 刺入下边界面的 V 型裂缝内。在高侧压 (300 kPa) 时, 剪切破坏如土样 5、土样 6 所示, 呈 X 型剪切破坏面, 随侧压的

增大, 由锥型剪切带破坏逐渐转变为 X 型破坏模式。

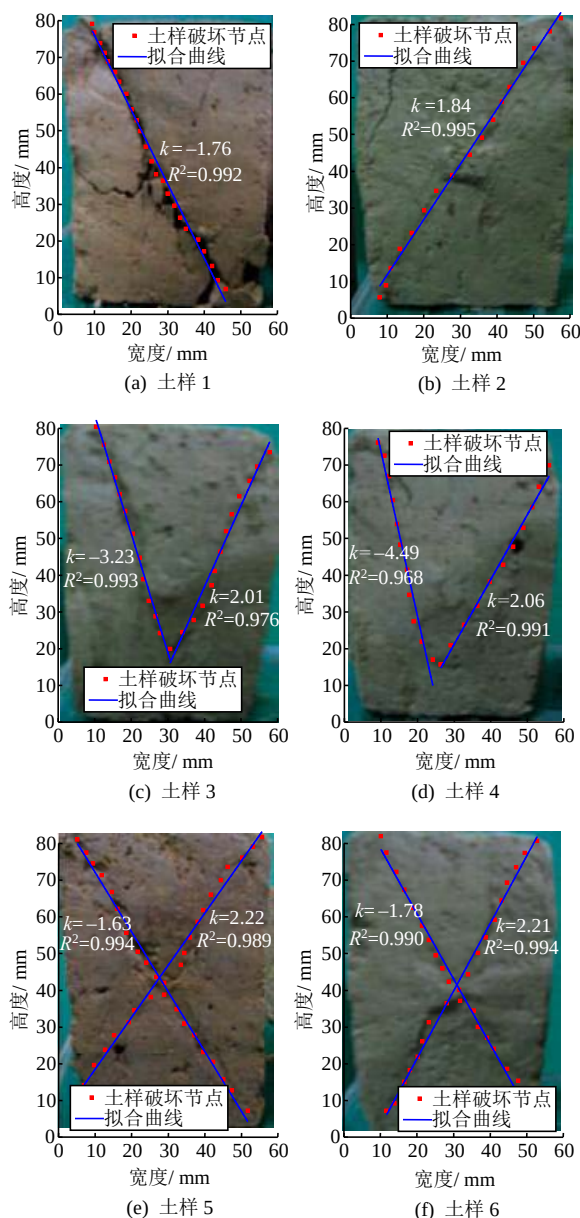


图 7 土样剪切破坏剪切带倾角实测图  
Fig.7 Experimental measurements of angle of inclination for shear band at shear failure of specimens

#### 4.3 剪切带倾角分析

剪切带破坏角试验值与计算值如表 2 所示。依据表 2 剪切带倾角计算值与试验值及图 8 相同含水率、不同侧压下的剪切带倾角变化曲线结果可知, 剪切带倾角的 Mohr-Coulomb (M-C)、Roscoe 计算值与平面应变试验实测值均随着固结侧压的增大而增大。其中, Mohr-Coulomb 计算值和实测值的增长幅度较小, Roscoe 计算值的增长幅度较大。相同含水率时, 随着侧压的增大, Mohr-Coulomb 与 Roscoe 计算值逐渐接近。可以看出, 考虑含水率、侧压影响的 Mohr-Coulomb 计算值更接近原状黄土

剪切带倾角的实测值，在固结侧压不断增大后，黄土的原生结构破坏增大，剪胀作用增强，Roscoe 计算值更接近实测值。

表2 剪切带倾角计算值和试验值

Table 2 Calculation and test values of angle of inclination for shear band

| 侧压 / kPa | 含水率 $w/\%$ | M-C 理论值 / (°) | Roscoe 理论值 / (°) | Arthur 理论峰值 / (°) | 实测值 / (°) |
|----------|------------|---------------|------------------|-------------------|-----------|
| 50       | 9          | 63.00         | 38.51            | 50.76             | —         |
| 100      | 9          | 63.00         | 47.57            | 55.28             | —         |
| 200      | 9          | 63.00         | 49.49            | 56.24             | —         |
| 300      | 9          | 63.12         | 57.96            | 60.54             | —         |
| 50       | 13         | 62.50         | 41.48            | 51.99             | —         |
| 100      | 13         | 62.68         | 51.73            | 57.20             | —         |
| 200      | 13         | 62.83         | 55.18            | 59.00             | —         |
| 300      | 13         | 64.00         | 62.24            | 63.12             | —         |
| 50       | 17         | 62.00         | 46.87            | 54.44             | 60.45     |
| 100      | 17         | 62.00         | 51.95            | 56.98             | 61.46     |
| 200      | 17         | 62.75         | 53.17            | 57.96             | 63.68     |
| 300      | 17         | 63.51         | 66.10            | 64.81             | 65.66     |
| 50       | 21         | 62.00         | 46.62            | 54.31             | —         |
| 100      | 21         | 62.00         | 53.09            | 57.54             | —         |
| 200      | 21         | 62.99         | 58.31            | 60.65             | —         |
| 300      | 21         | 62.19         | 62.77            | 62.48             | —         |
| 50       | 24         | 60.00         | 50.33            | 55.17             | —         |
| 100      | 24         | 60.00         | 54.43            | 57.22             | —         |
| 200      | 24         | 61.42         | 56.21            | 58.82             | —         |
| 300      | 24         | 60.75         | 60.03            | 60.39             | —         |

图9为相同侧压、不同含水率下的剪切带倾角变化曲线。由图可以看出，相同侧压下，随着含水率的增大，Mohr-Coulomb 剪切带倾角整体呈现减

小的趋势。由于含水率的增大使得黏聚力 $c$ 和内摩擦角 $\varphi$ 减小，导致动内摩擦角 $\varphi_m$ 改变，从而造成剪切带倾角的改变。相反，相同侧压下，Roscoe 剪切带倾角随着含水率的增大而呈现增大的趋势。由于含水率越高，水对黄土原生骨架间的削弱作用越明显，土颗粒重组变密、孔隙减小导致剪胀作用增大，使其与 Mohr-Coulomb 剪切带倾角越接近。

可以发现，在较高含水率（17%）、高侧向固结压力（300 kPa）下，原状黄土剪切带倾角的各计算值与试验值更加接近。笔者认为，较高含水率、高侧向固结压力显著破坏了原状黄土的原生结构，使其更加符合正常固结土特性，所以 Mohr-Coulomb、Roscoe 剪切带倾角的计算值与试验实测值三者更接近。

#### 4.4 剪切带倾角研究的应用

对于平面应变状态下黄土工程的稳定性问题，当天然原状黄土含水率及侧压受外界干扰因素发生变化，极限破坏的剪切滑动面倾角将发生相应的变化，并不像饱和砂土的 X 型分叉失稳一成不变。对于图 10<sup>[14]</sup>中平面应变条件下的黄土工程问题，为简化计算，假设滑动面的角度固定或是圆弧、对数螺旋线等角度变化的滑动面，未充分考虑含水率、大小主应力比和剪胀剪缩对剪切带倾角的影响。采用 Mohr-Coulomb 破坏准则做极限分析时，其黏聚力、内摩擦角都是固定值。而不同含水率、不同侧压下的平面应变黄土工程问题的极限分析时，采用表 2 中

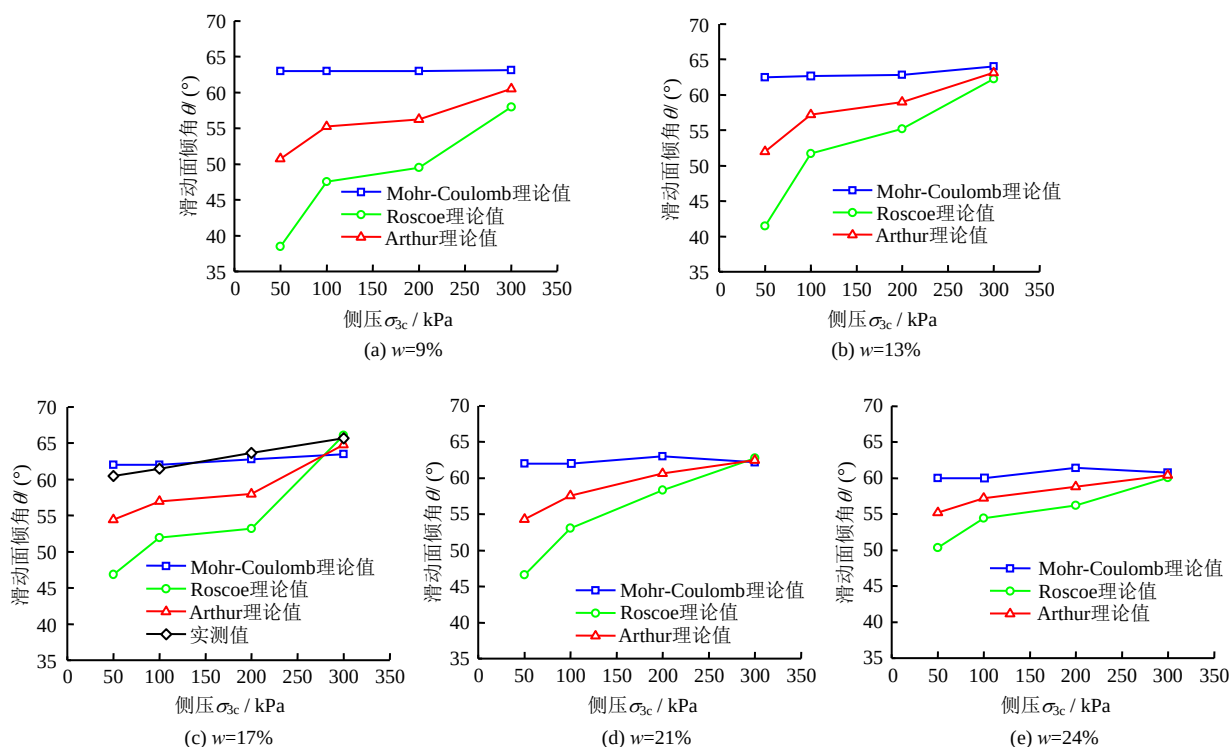


图8 相同含水率、不同侧压的剪切带倾角变化曲线

Fig.8 Curves of angle of inclination for shear band under different lateral pressures with the same water content

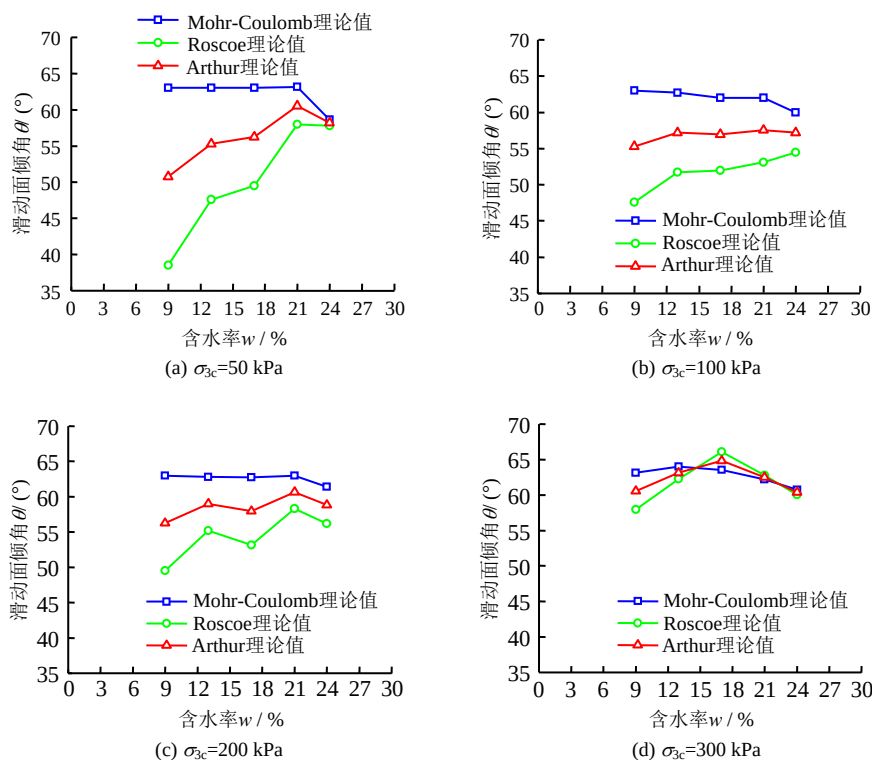


图9 相同侧压、不同含水率的剪切带倾角变化曲线

Fig.9 Curves of angle of inclination for shear band at different water contents with the same lateral pressure

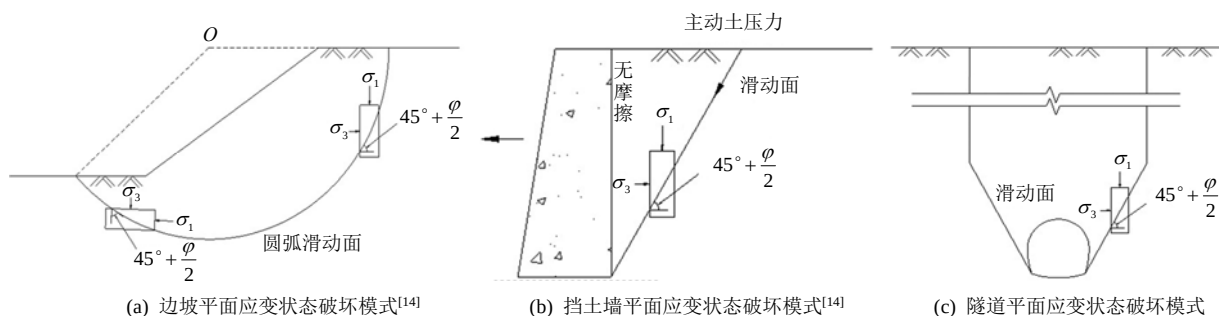


图10 平面应变状态下工程中土体剪切破坏形式

Fig.10 Shear failure modes of soil in engineering under plane strain

Mohr-Coulomb 计算值或试验值, 将更接近实际情况。实际的不同含水率、不同侧压下 Mohr-Coulomb 剪切带示意图如图 11 所示。

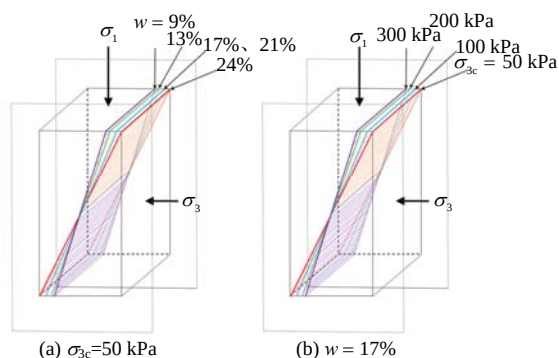


图11 不同含水率、侧压下的Mohr-Coulomb剪切带示意图  
Fig.11 Schematic diagram of Mohr-Coulomb shear band under different water contents and lateral pressures

## 5 结论

通过真三轴仪的改进对原状黄土进行不同含水率、不同侧向固结压力的平面应变试验, 结合 Mohr-Coulomb、Roscoe 剪切带倾角, 重点分析了不同因素对黄土的强度和剪切破坏时剪切带倾角的影响, 得出结论如下:

(1) 在平面应变状态下, 黄土的原生结构随着含水率增大而破坏、次生结构随之形成, 原状黄土应力-应变关系曲线从软化型向硬化型转变; 黏聚力、内摩擦角减小及剪胀作用增强, 导致剪切破坏时 Mohr-Coulomb 剪切带倾角减小、Roscoe 剪切带倾角增大。

(2) 在平面应变状态下, 黄土原生结构随侧向固结压力增大而破坏、次生结构随之形成, 原状黄

土应力-应变关系曲线从软化型向硬化型转变; 动内摩擦角增大及剪胀作用增强, 导致极限破坏时 Mohr-Coulomb、Roscoe 剪切带倾角增大。

(3) 在平面应变状态下, 黄土的剪切破坏模式随侧向固结压力的增大, 依次呈现单一剪切带、锥型剪切带和 X 型剪切破坏模式。

### 参考文献

- [1] 刘祖典. 黄土力学与工程[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1997: 1-5.  
LIU Zu-dian. Mechanics and engineering of loess[M]. Xi'an: Shaanxi Science and Technology Press, 1997: 1-5.
- [2] KHALID A ALSHIBLI, STEIN STURE. Shear band formation in plane strain experiments of sand[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2000, 126(6): 495-503.
- [3] 李广信. 土力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2013: 172-178.  
LI Guang-xin. Soil mechanics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2013: 172-178.
- [4] ROSCOE K H. The influence of strains in soil mechanics[J]. **Geotechnique**, 1970, 20(2): 129-170.
- [5] ARTHUR J, DUNSTAN T, AL-ANI Q, et al. Plastic deformation and failure in granular media[J]. **Geotechnique**, 1977, 27(1): 53-74.
- [6] 邵生俊, 陈菲, 代亚锋, 等. 结构性黄土的剪切带及强度特性的真三轴试验研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(增刊 1): 66-70, 84.  
SHAO Sheng-jun, CHEN Fei, DAI Ya-feng, et al. Shear band mechanism and strength characteristics of structural loess tested by true triaxial apparatus[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2015, 36(Suppl.1): 66-70, 84.
- [7] 邵生俊, 许萍, 陈昌禄. 土的剪切空间滑动面分析及各向异性强度准则研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(3): 422-435.  
SHAO Sheng-jun, XU Ping, CHEN Chang-lu. Several shear spatially mobilized planes and anisotropic strength criteria of soils[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2013, 35(3): 422-435.
- [8] 张玉, 邵生俊. 平面应变条件下黄土的竖向加载变形与强度特性分析[J]. 土木工程学报, 2016, 49(3): 112-121.  
ZHANG Yu, SHAO Sheng-jun. An analysis of vertical loading deformation and strength characteristics of loess under plain strain condition[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2016, 49(3): 112-121.
- [9] 张玉, 邵生俊, 赵敏, 等. 平面应变条件下结构性黄土本构模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(2): 485-496.  
ZHANG Yu, SHAO Sheng-jun, ZHAO Min, et al. Experimental study on constitutive models of structural loess under plane strain conditions[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2018, 37(2): 485-496.
- [10] 张玉, 邵生俊, 刘瑾, 等. 平面应变加、卸荷条件下考虑初始应力的原状黄土强度与变形特性试验研究[J]. 土木工程学报, 2019, 52(5): 90-100.  
ZHANG Yu, SHAO Sheng-jun, LIU Jin, et al. Experiment study on strength and deformation characteristics of intact loess considering initial stress under plane strain loading and unloading conditions[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2019, 52(5): 90-100.
- [11] 张玉, 邵生俊, 何晖, 等. 原状黄土的平面应变剪切、屈服性状的试验研究[J]. 土木工程学报, 2017, 50(10): 111-120.  
ZHANG Yu, SHAO Sheng-jun, HE Hui, et al. Experimental study on plane-strain shear and yield characteristics of intact loess[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2017, 50(10): 111-120.
- [12] 邵生俊, 罗爱忠, 邓国华, 等. 一种新型真三轴仪的研制与开发[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(8): 1172-1179.  
SHAO Sheng-jun, LUO Ai-zhong, DENG Guo-hua, et al. Development of a new true tri-axial apparatus[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2009, 31(8): 1172-1179.
- [13] 韩波, 李杭州, 宋丽. 原状黄土非线性强度特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(增刊 1): 117-121.  
HAN bo, LI Hang-zhou, SONG Li. Experimental study on nonlinear strength characteristics of intact loess[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2021, 43(Suppl.1): 117-121.
- [14] 松岗元. 土力学[M]. 罗汀, 姚仰平译. 北京: 中国水利水电出版社, 2001: 144-176.  
MASTSUOKA H. Soil mechanics[M]. Translated by LUO Ting, YAO Yang-ping. Beijing: China Water & Power Press, 2001: 144-176.