

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2020.129

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



不同平均主应力条件下重塑黄土的应力应变特性

刘红,张吾渝,冯永珍,王鹏

(青海大学土木工程学院;青海省建筑节能材料与工程安全重点实验室,西宁 810016)

摘要:利用 GDS 空心圆柱扭剪仪,在不同平均主应力条件下对青海重塑黄土进行一系列定向剪切试验,研究平均主应力对青海重塑黄土应力应变特性的影响。试验保持中主应力系数 b 不变,在不同平均主应力条件下,将重塑黄土试样分别进行主应力轴未发生旋转和旋转 45° 两种剪切破坏应力路径的剪切试验。结果表明:平均主应力和主应力方向角对重塑黄土的强度和变形有着显著影响;重塑黄土在大主应力方向角等于 45° 剪切破坏时峰值八面体剪应力与平均主应力呈线性关系,重塑黄土破坏时所产生的八面体剪应变发展趋势基本相同;剪切过程中,重塑黄土的大主应变和小主应变成对称发展,破坏时中主应变只有小幅度增长。当八面体剪应力-应变曲线没有出现峰值时,建议采用八面体剪应变为 15% 对应的八面体剪应力作为重塑黄土的破坏标准。

关键词:重塑黄土;主应力;主应变;破坏强度

中图分类号: TU411.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2021)06-0057-07

Study on stress-strain characteristics of remolded loess under different average principal stress conditions

LIU Hong, ZHANG Wuyu, FENG Yongzhen, WANG Peng

(School of Civil Engineering; Qinghai Provincial Key Laboratory of Energy-saving Building Materials and Engineering Safety, Qinghai University, Xining 810016, P. R. China)

Abstract: A series of directional shear tests on Qinghai remolded loess under different conditions of average principal stress were performed using the British GDS Hollow Cylindrical Torsion Shear Apparatus. The influence of the average principal stress on the stress-strain characteristics of the Qinghai remolded loess was studied. In the test, the principal stress coefficient b remained unchanged. Under different conditions of the average principal stress, the remolded loess samples were subjected to two kinds of shear failure stress paths in which the principal stress axis did not rotate and rotates 45° , respectively. The experimental results show that the average principal stress and the principal stress direction angle have a significant effect

收稿日期: 2020-06-08

基金项目: 国家自然科学基金(51768060);青海大学中青年科研基金(2018-QGY-5);青海省科技厅项目(2020-ZJ-738);青海省创新服务平台建设专项(2018-ZJ-T01)

作者简介: 刘红(1994-),男,主要从事岩土与地下工程研究, E-mail: qdlhbhl@163.com.

张吾渝(通信作者),女,教授, E-mail: qdzwuy@163.com.

Received: 2020-06-08

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (51768060); Qinghai University Youth and Youth Research Fund Project (2018-QGY-5); Qinghai Provincial Department of Science and Technology (2020-ZJ-738); Qinghai Province Innovation Service Platform Construction Special Project (2018-ZJ-T01)

Author brief: LIU Hong (1994-), main research interests: geotechnical and underground engineering, E-mail: qdlhbhl@163.com.

ZHANG Wuyu (corresponding author), professor, E-mail: qdzwuy@163.com.

on the strength and deformation of the remodeled loess; The octahedral peak shear stress of the remodeled loess has a linear relationship with the average principal stress of the remodeled loess when the major principal stress direction angle is equal to 45° shear failure. The development trend of the octahedral shear strain generated by the remodeled loess failure is basically the same; during the shearing process, the major and minor principal strains of the remodeled loess develop symmetrically, and the major principal strains increase only slightly during failure. When there is no peak in the octahedral shear stress-strain curve, it is recommended to use the octahedral shear stress corresponding to 15% of the octahedral shear strain as the destructive criterion for remodeled loess.

Keywords: remolded loess; principal stress; principal strain; failure strength

在交通、地震等荷载作用下,路基土体的应力路径复杂多变,尤其是主应力轴旋转这一应力路径普遍发生。应力路径影响着土体的强度和变形,只有在室内试验条件下还原土体所受应力状态,才能得出更可靠的试验结论。传统静三轴、动三轴等仪器不能实现主应力轴旋转,研究复杂应力路径下土体的力学特性有一定局限性,一些学者进行了主应力轴不发生旋转条件下围压对黄土应力-应变规律影响的研究^[1-3]。

随着土工设备的改进和研究领域的深入,解决了土体在复杂应力路径下力学特性研究的难题。空心圆柱扭剪仪是目前最先进的土工试验设备之一,能够实现涉及三向应力和主应力轴旋转在内的多种复杂应力路径。学者们利用空心圆柱扭剪仪,对土体在主应力轴单调旋转条件下的定向剪切进行了大量的研究。Symes 等^[4]、Towhata 等^[5]通过空心圆柱扭剪仪对砂土进行了复杂应力路径试验,发现主应力轴旋转对砂土的力学特性有很大影响。Sayao 等^[6]发现最大剪应变随 α 增大而增大。Blanc 等^[7]发现干砂在主应力轴发生旋转时会产生弹性变形和塑性变形。Tong 等^[8]对砂土进行了主应力轴旋转试验,探讨了 4 个应变分量及体应变发展趋势。沈扬等^[9]发现主应力方向及中主应力参数决定原状软黏土破坏时剪应力峰值及剪切带开展特征。王钰轲等^[10-11]对饱和软黏土进行了不同围压下的主应力轴连续旋转的扭剪试验。周向阳等^[12]研究了定向剪切路径下主应力方向角 α 对重塑黄土剪切过程的影响,发现重塑黄土应力-应变曲线大致呈现出硬化特性。翁效林等^[13]发现重塑黄土剪切强度与中主应力系数 b 和主应力轴方向角 α 有着很大关系。陈伟等^[14]、冯永珍等^[15]对重塑黄土进行了不同主应力方向角下定向剪切试验研究。

综上所述,大量学者进行了定向剪切试验和主

应力轴旋转试验,研究了主应方向角、中主应力系数等因素对土体的强度特性和变形规律影响,发现土体主应力轴旋转下应力-应变曲线差异性很大。但平均主应力也是影响土体主应力轴旋转条件下强度的重要因素,主应力轴旋转应力路径的研究对象以砂土和黏土为主,不同平均主应力下青海黄土主应力轴旋转的研究较少。由于不同深度下黄土所受平均主应力差异很大,所以不同平均主应力下黄土应力-应变规律受主应力轴旋转影响的问题亟需解决。为了探究青海地区重塑黄土在这种复杂应力路径下的应力-应变特性,进行了不同平均主应力情况下重塑黄土主应力轴不发生旋转和主应力轴旋转到 45° 的 8 组定向剪切试验。重点研究了平均主应力和大主应力旋转角对重塑黄土应力-应变的影响,提出该情况下重塑黄土的破坏标准以及强度估算公式,为青海黄土地区的工程建设提供理论依据。

1 试验设计

1.1 试验仪器及原理

采用的试验仪器为高精度空心圆柱扭剪仪。该仪器采用两个独立马达施加轴力 W 和扭矩 M_T , 压力室对空心圆柱试样独立施加内围压 P_i 和外围压 P_o , 从而实现单独或同时控制平均主应力 p 、中主应力系数 b 、大主应力方向角 α 和偏应力 q 等参数变化的复杂应力路径。根据土体受力状态,在应力模块中设定 p 、 b 、 q 、 α 等参数,参数的推导过程参考 Hight 等^[16]的研究。空心圆柱土样上试样单元受力如图 1 所示。

各参数与土单元体的主应力和应力分量关系为见式(1)~式(4)。

$$p = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3 = (\sigma_z + \sigma_r + \sigma_\theta)/3 \quad (1)$$

$$q = (\sigma_1 - \sigma_3)/2 = \sqrt{(\sigma_z - \sigma_\theta)^2/4 + \tau_{z\theta}^2} \quad (2)$$

$$b = \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3} = \frac{\frac{2\sigma_r - \sigma_z - \sigma_\theta}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_z - \sigma_\theta}{2}\right)^2 + \tau_{z\theta}^2}}{\sqrt{(\sigma_z - \sigma_\theta)^2 + 4\tau_{z\theta}^2}} \quad (3)$$

$$\alpha = \frac{1}{2} \tan^{-1}(2\tau_{z\theta}/(\sigma_z - \sigma_\theta)) \quad (4)$$

式中: p 为平均主应力; b 为中主应力系数; α 为大主应力方向角; q 为偏应力; σ_z 为轴向应力; σ_θ 为环向应力; σ_r 为径向应力; $\tau_{z\theta}$ 为扭转剪应力; σ_1 为大主应力; σ_2 为中主应力; σ_3 为小主应力。

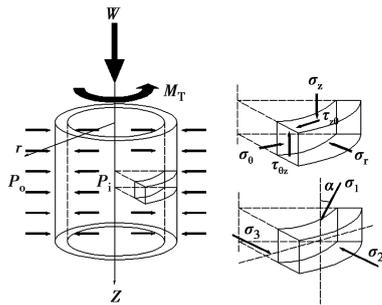


图 1 空心圆柱试样加载方式及单元体受力示意图

Fig. 1 Schematic diagram of loading method of hollow cylindrical specimen and stress of unit body

1.2 试样制备

试样用土取自青海西宁某施工场地,黄土试样的物理参数见表 1。

表 1 土样物理参数

Table 1 Basic parameters of the loess

最大干密度/ ($g \cdot cm^{-3}$)	相对 密度	最优含水 率/%	液限/%	塑限/%
1.80	2.72	14.4	21.4	14.7

击实实验测得最优含水率和最大干密度分别为 14.4% 和 1.80 g/cm^3 。将取回的散土先在烘箱中烘干 8 h 以上,再过 2 mm 土工筛,取筛下土备用。按 14.4% 的最优含水率称取相应的干土和水配置成干密度为 1.67 g/cm^3 的湿土,将湿土放在容器中静置 24 h,让黄土润湿均匀。计算击实桶所需湿土总质量,将湿土分为 10 层,控制每层土样的击实高度为 2 cm,将每层土样依次击实到相应高度,直至击实完成。将击实好的土样放到掏空心的仪器上,分两次掏取 60 mm 的空心,最后制成的空心圆柱试样试样尺寸为 200 mm \times 100 mm \times 60 mm (高度 \times 外直径 \times 内直径)。

1.3 实验方案

为研究平均主应力 p 和特殊主应力旋转角 α 对

重塑黄土变形和强度的影响,设计了 8 组定向剪切路径,具体试验方案设置如表 2 所示。当试样安装完成后,对试样进行等向固结,固结稳定标准参照中国规范《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019),黄土试样每小时的轴向位移变形量不大于 0.01 mm 时认为固结完成。对固结完成后试样进行相应的复杂应力路径试验。首先进行应力路径调试,将偏应力 q 增加到 5 kPa,中主应力系数 b 增加到 0.5,然后将大主应力方向角 α 从 0° 旋转到 45°,大主应力方向角的旋转速度为 2(°)/min,最后保持 p 、 b 、 α 不变,以 2 kPa/min 的加载速度增大偏应力 q ,直至破坏。由式(1)~式(4)可以得到定向剪切过程中应力与 p 、 b 、 q 、 α 之间的关系式为

$$\left. \begin{aligned} \sigma_z &= p - (2bq - q)/3 + q \cos 2\alpha \\ \sigma_r &= p + 2(2bq - q)/3 \\ \sigma_\theta &= p - (2bq - q)/3 - q \cos 2\alpha \\ \tau_{z\theta} &= q \sin 2\alpha \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

$$\left. \begin{aligned} \sigma_1 &= p - (2bq - 4q)/3 \\ \sigma_2 &= p + 2(2bq - q)/3 \\ \sigma_3 &= p - (2bq + 2q)/3 \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

土体相应的主应变计算公式为

$$\left. \begin{aligned} \epsilon_1 &= \frac{\epsilon_z + \epsilon_\theta}{2} + \sqrt{\left(\frac{\epsilon_z - \epsilon_\theta}{2}\right)^2 + \gamma_{z\theta}^2} \\ \epsilon_2 &= \epsilon_r \\ \epsilon_3 &= \frac{\epsilon_z + \epsilon_\theta}{2} - \sqrt{\left(\frac{\epsilon_z - \epsilon_\theta}{2}\right)^2 + \gamma_{z\theta}^2} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式中: ϵ_1 为大主应变; ϵ_2 为中主应变; ϵ_3 为小主应变; $\gamma_{z\theta}$ 为扭转剪应变; ϵ_z 为轴向应变; ϵ_θ 为环向应变; ϵ_r 为径向应变; $\gamma_{z\theta}$ 为扭转剪应变。

表 2 试验方案及参数设置

Table 2 Test scheme and parameter settings

编号	p/kPa	b	大主应力 方向角 $\alpha/(^\circ)$	q/kPa
L101	50	0.50	0~45	剪切至破坏
L102	100	0.50	0~45	剪切至破坏
L103	150	0.50	0~45	剪切至破坏
L104	200	0.50	0~45	剪切至破坏
L105	250	0.50	0~45	剪切至破坏
L106	300	0.50	0~45	剪切至破坏
L107	100	0.50	0	剪切至破坏
L108	200	0.50	0	剪切至破坏

2 试验结果分析

2.1 应力-应变特性

空心圆柱扭剪试样土单元体与三轴试验土单元体所受应力不同,常规三轴的土单元体上只受主应力作用,分析相对简单。而空心圆柱扭剪试样土单元体受到 4 个独立应力分量的作用,试样单元体处于复杂的空间应力状态,产生相应复杂的应变分量。为了更好地反映试样单元体在定向剪切路径下的应力-应变状态,参照 Zdravkovic 等^[17]采用八面体剪应力 q_{oct} 和八面体剪应变 ϵ_{oct} 来阐述复杂应力状态下重塑黄土的应力变形状态。其中

$$q_{\text{oct}} = \frac{1}{\sqrt{3}} \sqrt{\sigma_z^2 + \sigma_r^2 + \sigma_\theta^2 + 3\tau_{z\theta}^2 - \sigma_z\sigma_\theta - \sigma_z\sigma_r - \sigma_r\sigma_\theta} \quad (8)$$

$$\epsilon_{\text{oct}} = \frac{1}{\sqrt{3}} \sqrt{4(\epsilon_z^2 + \epsilon_r^2 + \epsilon_\theta^2) + 3\gamma_{z\theta}^2 - 4(\epsilon_z\epsilon_\theta + \epsilon_z\epsilon_r + \epsilon_r\epsilon_\theta)} \quad (9)$$

由图 2 可知,在经历过主应力轴旋转的剪切路径下,平均主应力大小对重塑空心圆柱黄土应力-应变曲线有显著影响,重塑黄土峰值八面体剪应力随着平均主应力增大而增大,八面体剪应变随着八面体应力增加而增大。相同剪应变下,不同平均主应力 p 下试样的强度发挥程度明显不同,且重塑黄土试样呈现出塑性破坏特征,这与陈伟等^[14]研究得出的重塑黄土在不同主应力方向角剪切下应力-应变发展趋势相似。

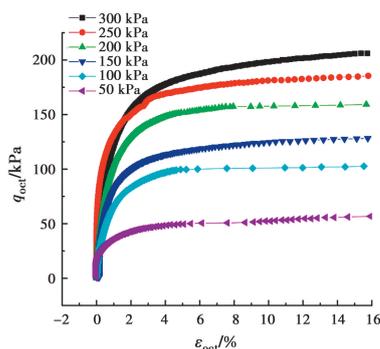


图 2 八面体剪应力与八面体剪应变的变化曲线

Fig. 2 Variation curve of octahedral shear stress and octahedral shear strain

应力-应变发展趋势可以大致分为 3 个阶段,应变缓慢发展阶段、应变发展较快阶段和应变快速发展阶段。在应变发展缓慢阶段,八面体剪应变增加到 0.5%,重塑黄土试样的强度发挥程度接近 50%,

八面体剪应力发展趋势几乎陡直增长。这是由于剪切初期重塑黄土试样完好,颗粒排列比较紧密,重塑黄土刚度比较大,具有很大抵抗变形能力。随着八面体剪应力进一步增大,重塑空心圆柱黄土试样进入应变发展较快阶段,重塑空心圆柱黄土试样八面体剪应变逐渐增大到 4%,重塑黄土试样强度发挥程度接近 86%,八面体剪应力发展趋势呈曲线缓慢增长。由于随着八面体剪应力增大,土体刚度降低,颗粒之间孔隙形态发生改变,土颗粒排列形式被破坏,颗粒之间咬合作用减弱,重塑黄土试样开始逐渐屈服。在应变快速发展阶段,重塑黄土试样八面体剪应变大幅度增长至破坏,而八面体剪应力却只有小幅度增长,应力-应变变化趋势几乎呈水平直线状态,试样说明重塑黄土结构性被破坏,承载力丧失,土体刚度接近于 0,丧失了抵抗变形能力,处于破坏阶段,最后产生扭剪破坏面。

为了说明主应力轴旋转对重塑黄土应力应变特性影响,设置 $p=100, 200$ kPa 下主应力轴未发生旋转的对比剪切试验。

由图 3 可以看出,重塑黄土经历 0° 到 45° 主应力轴旋转后抗剪强度比主应力方向角为 0° 的抗剪强度低,在平均主应力越低的情况下表现得越明显,说明重塑黄土具有很强的次生各向异性。主应力轴旋转对应力-应变曲线发展趋势也有很大影响,主应力方向角为 0° 的相对于 45° 的试样,剪切前期八面体剪应变发展更缓慢,八面体剪应力发展趋势更陡,由于未经历主应力轴旋转的试样具有更大刚度,抵抗变形能力比经历主应力轴旋转的试样更强。还可以看出,经历主应力轴旋转 $\alpha=45^\circ$ 剪切破坏时重塑黄土的延性比 $\alpha=0^\circ$ 时大, $\alpha=0^\circ$ 的试样剪切后期有明显的拐点,说明其破坏特性略显脆性。表明主应力轴旋转这一应力路径对土体性状产生了较大影响,与 Towhata 等^[5]研究主应力轴旋转剪切对砂土力学特征影响的结论相似。

2.2 重塑黄土的剪切破坏标准

在复杂应力路径下土体强度破坏标准选取的研究中,沈扬等^[9]研究发现,定向剪切路径下原状软黏土的八面体剪应变达到 5% 时,强度发挥程度超过 90%,并且认为用八面体剪应变评价试样破坏强度的标准更合理。陈伟等^[14]建议定向剪切应力路径下采用广义剪应变达到 15% 时对应的广义剪应力作为击实黄土的破坏标准。沈瑞福等^[18]认为将广

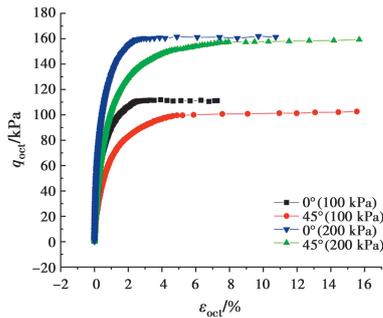


图 3 $p=100、200$ kPa 下重塑黄土的八面体剪应力与八面体剪应变的变化曲线

Fig. 3 Curves of octahedral shear stress and octahedral shear strain of reshaped loess at $p=100$ kPa and 200 kPa

义剪应变 $\gamma_g=10\%$ 时的应力作为砂土在主应力轴连续旋转条件下的动强度破坏标准。在三轴试验中,土工试验规范规定,对于没有出现峰值点的曲线,取 15% 轴向应变作为破坏点。然而若选择单一方向变形作为土体的破坏标准缺乏有力的说服力。参照前人对强度破坏标准的选取,采用八面体剪应变作为破坏标准。由图 2 和图 3 可以看出,在不同平均主应力 p 下, $\alpha=0^\circ$ 的试样剪切过程中呈现脆性破坏,出现了八面体剪力峰值,可以将峰值 q_{oct} 作为该路径下试样破坏的一种强度标准,剪切破坏土样如图 4(a) 所示, 0° 剪切破坏的试样发生鼓胀。但不同平均主应力 p 下 $\alpha=45^\circ$ 的试样剪切过程中呈现塑性破坏,随着八面体剪应力的增加,应变一直增加,试样没有出现应变软化。由应变的发展模式可以看到,在剪切后期八面体剪应变为 15% 时,重塑黄土试样刚度几乎接近 0, 丧失了抵抗变形的能力。而且当 $\epsilon_{oct}=15\%$ 时,试样出现明显的剪切带,试样产生剪缩现象,破坏试样如图 4(b) 所示。汪闻韶^[19] 指出选择容许变形量作为土体的剪切破坏标准具有更强普适性。为了安全起见,当重塑黄土应力应变曲线未出现剪应力峰值时,建议取 $\epsilon_{oct}=15\%$ 时对应的八面体剪应力作为不同平均主应力路径下重塑黄土的强度破坏标准。

2.3 主应变-偏应力关系

图 5 为选取平均主应力为 $100、200、300$ kPa 时,考虑大主应力方向角 α 经历 0° 旋转到 45° 这一应力路径,重塑黄土大主应力方向角保持 45° 定向剪切下 3 个主应变 $\epsilon_1、\epsilon_2、\epsilon_3$ 的变化规律。从图 5 中可以看出,重塑黄土的大主应力轴从 0° 旋转到 45° 产生的主应变很小,发展趋势几乎是一条水平线,说明纯主

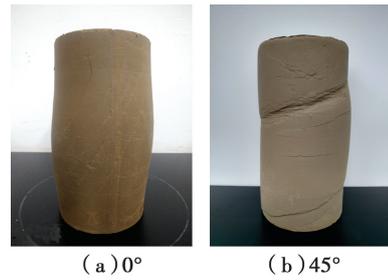


图 4 $p=100$ kPa 时剪切破坏的试样
Fig. 4 Samples with shear failure at $p=100$ kPa

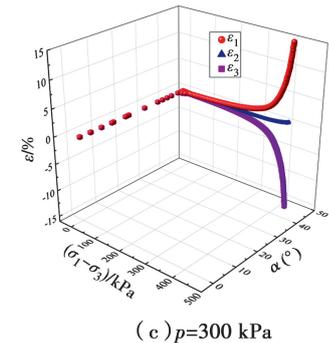
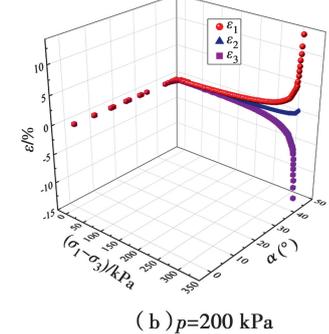
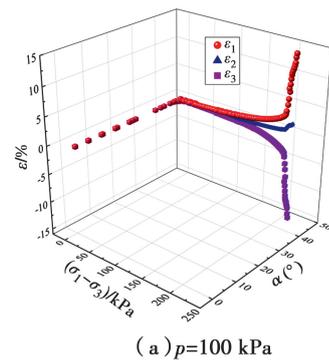


图 5 各主应变随剪应力变化曲线

Fig. 5 Variation of each principal strain with shear stress

应力轴旋转对重塑黄土的主应变影响很小。在大主应力方向角为 45° 的定向剪切前期,重塑黄土处于平面应变状态,大主应变朝着正向发展,中主应变保持为 0,小主应变朝着负向发展。这是由于 $\alpha=45^\circ$ 时,重塑黄土处于纯扭剪的应力状态,这种状态下 γ_{20} 显著开展, ϵ_2 变化很小,导致主应变进行相应变化。随

着偏应力增加,大主应变和小主应变呈对称发展趋势。但不同平均主应力下重塑黄土的应力-应变发展趋势有所区别。在 $p=300$ kPa 以上,重塑黄土的偏应力-主应变曲线呈现出光滑抛物线,大主应变和小主应变对称开展的角度比较大,重塑黄土具有较好延性特征。而在平均主应力 $p=100$ kPa 以下,重塑黄土大主应变和小主应变对称发展的角度较小,在剪切后期,重塑黄土的应力应变曲线有明显转角,大主应变和小主应变陡直增长,延性特征较差。这是由于在平均主应力较低的情况下,土体将要破坏时,重塑黄土承载力丧失,抵抗变形的能力降低,随着偏应力的增加,大主应变和小主应变大幅度增长。这与冯永珍等^[15]研究得出的偏应力-主应变曲线规律相吻合。

图 6 和图 7 是选取平均主应力为 100、200 kPa 时,大主应力方向角未旋转时重塑黄土定向剪切下 3 个主应变 ϵ_1 、 ϵ_2 、 ϵ_3 分别随偏应力的变化规律。从图中可以看出,主应力轴未发生旋转的重塑黄土,大主应变 ϵ_1 和小主应变 ϵ_3 没有呈现出对称开展的现象,这是由于 $\alpha=0^\circ$ 时,重塑黄土处于三轴压缩或三轴拉伸状态。剪切初期随着偏应力增加,重塑黄土的中主应变有往正向发展趋势,小主应变 ϵ_3 往负向发展趋势大于大主应变 ϵ_1 向正向发展趋势。从剪切后期可以看出,重塑黄土大主应变和小主应变有明显转角,且中主应变 ϵ_2 开始增长,破坏时大主应变 ϵ_1 小于小主应变 ϵ_3 ,中应变 ϵ_2 小幅度增长。 $p=200$ kPa 条件下破坏时主应变大于 $p=100$ kPa 下主应变,说明平均主应力影响着重塑黄土主应变的开展。

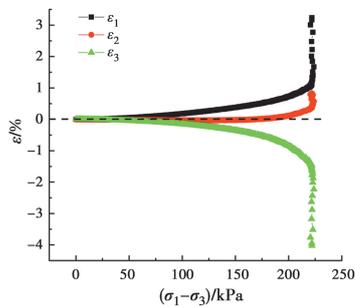


图 6 L107 试样主应变随偏应力变化规律

Fig. 6 Variation of principal strain of L107 specimen with bias stress

图 8、图 9 和图 10 比较了不同平均主应力 p 下大主应力方向角 $\alpha=0^\circ$ 和大主应力方向角 $\alpha=45^\circ$ 时,定向剪切下大主应变 ϵ_1 、中主应变 ϵ_2 和小主应变 ϵ_3

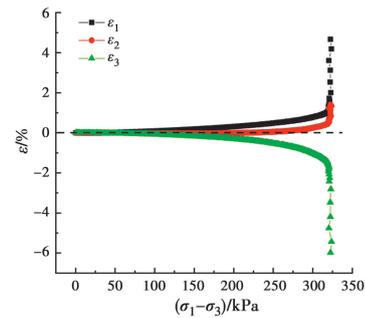


图 7 L108 试样主应变随偏应力变化规律

Fig. 7 Variation of principal strain of L108 specimen with deviating stress

分别随偏应力的变化规律。由图中可以看出,大主应力方向角对重塑黄土的大主应变有很大影响,主应力方向角为 0° 与主应力方向角为 45° 的破坏现象有很大不同,经过对比可以看出,未经过主应力轴旋转的试样,大主应变 ϵ_1 开展程度比经过主应力轴旋转的土样小, $\alpha=0^\circ$ 破坏时大主应变 ϵ_1 约为强度 = 45° 破坏时大主应变的 20%~30%。由偏应力-中主应变曲线可知,在试样剪切破坏时,中主应变朝着正向开展,但开展程度较小,破坏时中主应变小于 2%。从偏应力-小主应变的曲线也可以看出,小主应变的发展趋势和大主应变发展趋势相同,但方向相反。 $\alpha=0^\circ$ 时土样的小主应变约为 $\alpha=45^\circ$ 的 30%~40%,说明 $\alpha=0^\circ$ 和 $\alpha=45^\circ$ 剪切破坏形式不同。

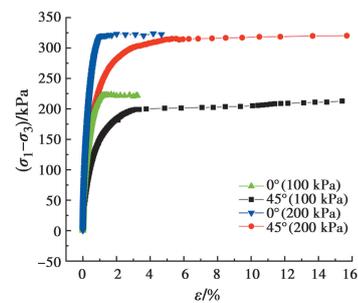


图 8 大主应变随偏应力变化曲线

Fig. 8 Curve of large principal strain with deviating stress

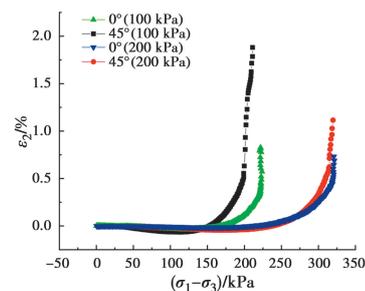


图 9 中主应变随偏应力变化曲线

Fig. 9 Variation of principal strain with deviating stress

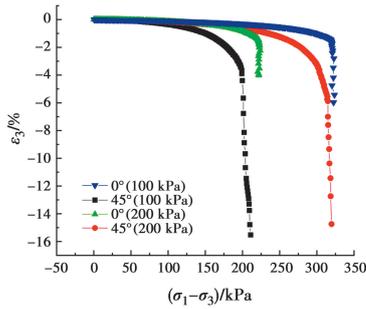


图 10 小主应变随偏应力变化曲线

Fig. 10 Curve of small principal strain with deviating stress

3 平均主应力与强度的关系

图 11 中采用一次函数对不同 p 下重塑黄土的 q_f 试验结果进行了拟合(p 为平均主应力、 q_f 为峰值八面体剪应力)。

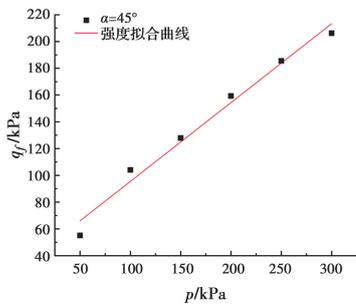


图 11 八面体峰值剪应力的变化规律

Fig. 11 Variation of peak octahedral shear stress

试验结果表明,重塑黄土 q_f 与 p 呈线性关系,拟合曲线表达形式为

$$q_f = (0.58913 \pm 0.03992)p + (36.54695 \pm 7.7728) \quad (10)$$

式中相关系数 $R^2 = 0.98197$ 。可以看到,不同平均主应力下重塑黄土的破坏峰值具有很大差异。随着平均主应力的增大,峰值剪应力也逐渐增加,几乎呈线性增长的趋势。当 $p < 150$ kPa 时,土体的结构强度略高于平均主应力的数值;当 $p \geq 150$ kPa 时,土体的结构强度低于平均主应力的数值。

4 结论

对青海地区重塑黄土进行了不同平均主应力条件下考虑主应力轴旋转的剪切试验,研究了重塑黄土在复杂应力路径下的应力-应变关系特征,得到以下结论:

1) 重塑黄土在主应力轴旋转的剪切应力路径下,与主应力轴未发生旋转的试样强度和变形有显

著不同。试样破坏时八面体剪应力受平均主应力影响较大, q_f 与平均主应力呈线性关系,破坏时 ϵ_{oct} 范围变化比较稳定。

2) 为了综合反映不同平均主应力下重塑黄土的剪切标准,建议采用八面体剪应变作为重塑黄土的破坏标准。应力-应变曲线出现峰值时,选取峰值八面体剪应力作为破坏点,没有出现峰值时,选取 15% 八面体剪应变所对应八面体剪应力作为破坏点。

3) 在 $\alpha = 45^\circ$ 定向剪切过程中,破坏前处于平面应力状态,主应变开展表现为 $\epsilon_1 > 0, \epsilon_2 \approx 0, \epsilon_3 < 0$; 大主变 ϵ_1 和小主应变 ϵ_3 围绕中主应变 ϵ_2 对称开展,在 $\alpha = 0^\circ$ 定向剪切过程中,没有对称开展现象,小主应变 ϵ_3 发展比较快。在 $\alpha = 0^\circ$ 和 $\alpha = 45^\circ$ 的破坏阶段,中主应变 ϵ_2 变化幅度都很小。

4) 经历主应力轴旋转的试样主应变发展规律表现出延性,平均主应力越大延性越好,抵抗变形能力越强,主应力轴未旋转的试样主应变开展表现出脆性。

参考文献:

[1] 朱志坤. 干密度和含水量对太原重塑黄土强度及强度参数影响的研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2018.
ZHU Z K. Effect of dry density and water content on the strength and strength parameters of Taiyuan remolded loess [D] Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2018. (in Chinese)

[2] 马林, 张军, 刘亚明. 车辆荷载作用下山西路基重塑黄土的动力特性研究[J]. 地震工程学报, 2018, 40(1): 101-104.
MA L, ZHANG J, LIU Y M. Study on the dynamic characteristics of remolded loess in Shanxi expressway subgrade under vehicle loads [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2018, 40(1): 101-104. (in Chinese)

[3] 张玉, 邵生俊, 陈菲, 等. 不同应力路径条件下原状 Q_3 黄土的强度特性及破坏方式试验研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(Sup2): 99-106.
ZHANG Y, SHAO S J, CHEN F, et al. Experimental study on strength characteristics and failure modes of undisturbed Q_3 loess under different stress paths [J] Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(Sup2): 99-106. (in Chinese)

[4] SYMES M J, GENS A, HIGHT D W. Undrained anisotropy and principal stress rotation in saturated sand [J]. Geotechnique, 1984, 34(1): 11-27.

- [5] TOWHATA I, ISHIHARA K. Undrained strength of sand undergoing cyclic rotation of principal stress axes [J]. *Soils and Foundations*, 1985, 25(2): 135-147.
- [6] SAYAO A, VAID Y P. Drained principal stress rotation in saturated sand [J]. *Geotechnique*, 1989, 39(3): 549-552.
- [7] BLANC M, BENEDETTO H D, TIOUJANI S. Deformation characteristics of dry hostun sand with principal stress axes rotation [J]. *Soils and Foundations*, 2011, 51(4): 749-760.
- [8] TONG Z X, YU Y L, ZHANG J M, et al. Deformation behavior of sands subjected to cyclic rotation of principal stress axes [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2008, 30(8): 1196-1202.
- [9] 沈扬, 周建, 龚晓南, 等. 考虑主应力方向变化的原状软黏土应力应变性状试验研究[J]. *岩土力学*, 2009, 30(12): 3720-3726.
SHEN Y, ZHOU J, GONG X N, et al. Experimental study on stress-strain behavior of intact soft clay considering changes in principal stress direction [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 30(12): 3720-3726. (in Chinese)
- [10] 王钰轲, 黎冰. 扭剪作用下饱和软黏土轴向纯压循环变形及模量软化特性试验研究[J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2019, 49(5): 981-988.
WANG Y K, LI B. Experimental study on axial pure pressure cyclic deformation and modulus softening characteristics of saturated soft clay under torsional shear [J]. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 2019, 49(5): 981-988. (in Chinese)
- [11] 王钰轲, 万永帅, 方宏远, 等. 圆形应力路径下软黏土的动力特性试验研究[J]. *岩土力学*, 2020, 41(5): 1643-1652.
WANG Y K, WAN Y S, FANG H Y, et al. Experimental study on dynamic characteristics of soft clay under circular stress path [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2020, 41(5): 1643-1652. (in Chinese)
- [12] 周向阳, 林清辉, 严佳佳. 主应力方向和中主应力对重塑黄土变形及强度特性的影响[J]. *工业建筑*, 2016, 46(10): 83-88.
ZHOU X Y, LIN Q H, YAN J J. Effects of principal stress direction and intermediate principal stress on characteristic of deformation and strength for remolded loess [J]. *Industrial Construction*, 2016, 46(10): 83-88. (in Chinese)
- [13] 翁效林, 赵彦虎, 张玉伟, 等. 主应力轴旋转条件下黄土变形特性试验[J]. *中国公路学报*, 2018, 31(5): 9-16.
WENG X L, ZHAO Y H, ZHANG Y W, et al. Experimental study on deformation characteristics of loess under condition of principal stress axes rotation [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2018, 31(5): 9-16. (in Chinese)
- [14] 陈伟, 张吾渝, 常立君, 等. 定向剪切应力路径下击实黄土各向异性试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2015, 34(S2): 4320-4324.
CHEN W, ZHANG W Y, CHANG L J, et al. Experimental study of anisotropy of compacted loess under directional shear stress path [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2015, 34(S2): 4320-4324. (in Chinese)
- [15] 冯永珍, 张吾渝, 马艳霞, 等. 考虑偏应力比影响的主应力轴旋转下重塑黄土变形研究[J]. *防灾减灾工程学报*, 2018, 38(3): 535-541.
FENG Y Z, ZHANG W Y, MA Y X, et al. Deformation analysis of remolded loess under principal stress axes rotation considering the effect of deviatoric stress ratio [J]. *Journal of Disaster Prevent and Mitigation Engineering*, 2018, 38(3): 535-541. (in Chinese)
- [16] HIGHT D W, GENS A, SYMES M J. The development of a new hollow cylinder apparatus for investigating the effects of principal stress rotation in soils [J]. *Geotechnique*, 1983, 33(4): 355-383.
- [17] ZDRAVKOVIC L, JARDINE R J. Some anisotropic stiffness characteristics of a silt under general stress conditions [J]. *Geotechnique*, 1997, 47(3): 407-437.
- [18] 沈瑞福, 王洪瑾, 周克骥, 等. 动主应力旋转下砂土孔隙水压力发展及海床稳定性判断[J]. *岩土工程学报*, 1994, 16(3): 70-78.
SHEN R F, WANG H J, ZHOU K J, et al. Building-up of pore water pressure under cyclic rotation of principal stress and evaluation of stability of seabed deposit [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1994, 16(3): 70-78. (in Chinese)
- [19] 汪闻韶. 土体液化与极限平衡和破坏的区别和关系[J]. *岩土工程学报*, 2005, 27(1): 1-10.
WANG W S. Distinction and interrelation between liquefaction, state of limit equilibrium and failure of soil mass [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2005, 27(1): 1-10. (in Chinese)