

不同应力路径下饱和重塑黄土的力学特性

赵丹旗, 付昱凯, 侯晓坤, 李同录, 李萍, 李燕, 张林

Mechanical properties of saturated remolded loess under different stress paths

ZHAO Danqi, FU Yukai, HOU Xiaokun, LI Tonglu, LI Ping, LI Yan, and ZHANG Lin

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202201020>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

盾构施工与波浪荷载耦合作用后软土力学特性

Mechanical properties of soft clay after coupling between shield construction and wave loading

刘浩旭, 朱剑锋, 饶春义, 潘斌杰 水文地质工程地质. 2019, 46(4): 97-103

不同类型黏土的强度特性及其预测

Strength of different clayey soils and its prediction

陈嘉伟, 高游, 付俊杰, 李东映 水文地质工程地质. 2020, 47(3): 101-106

含孔洞裂隙岩体灌浆后力学特性的物理试验与数值模拟

Experimental and numerical simulation of the mechanical characteristics of rocks containing hole and flaw after grouting

张科, 刘享华, 杨红宣, 范文臣 水文地质工程地质. 2019, 46(1): 79-79

三峡库区藕塘滑坡变形特点及复活机制研究

A study of the deformation characteristics and reactivation mechanism of the Outang landslide near the Three Gorges Reservoir of China

黄达, 匡希彬, 罗世林 水文地质工程地质. 2019, 46(5): 127-135

基于层次聚类算法的孔压静力触探土体分类方法及试验研究

Soil classification method and experimental research on CPTU based on the hierarchical clustering algorithm

邱敏, 宋友建, 丛璐, 梅年峰, 王闫超 水文地质工程地质. 2019, 46(3): 117-117

穿越地裂缝带地铁隧道结构分段长度优化研究

Optimal length for segmented structure of the metro tunnel obliquely crossing active ground fissure zone

黄强兵, 姜紫看, 邓亚虹, 王立新, 胡士伟 水文地质工程地质. 2019, 46(2): 109-109



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202201020

赵丹旗, 付昱凯, 侯晓坤, 等. 不同应力路径下饱和重塑黄土的力学特性 [J]. 水文地质工程地质, 2022, 49(6): 74-80.
ZHAO Danqi, FU Yukai, HOU Xiaokun, *et al.* Mechanical properties of saturated remolded loess under different stress paths[J].
Hydrogeology & Engineering Geology, 2022, 49(6): 74-80.

不同应力路径下饱和重塑黄土的力学特性

赵丹旗^{1,2}, 付昱凯^{1,2}, 侯晓坤³, 李同录^{1,2}, 李 萍^{1,2}, 李 燕^{1,2}, 张 林^{1,2}

(1. 长安大学地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054; 2. 黄土高原水循环与地质环境教育部野外科学观测研究站, 甘肃 正宁 745399; 3. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029)

摘要: 土体的力学特性往往因应力状态和应力路径而异。为了探讨垂直加载和等剪路径下饱和土的力学特性, 制备饱和重塑黄土试样, 通过固结不排水(CU)和常剪应力排水剪(CSD)三轴试验, 分别测定并绘制其应力-应变曲线、孔隙水压力变化曲线和应力路径曲线。试验结果表明, 饱和重塑黄土在 2 种路径下有明显不同的变形特点: CU 路径下的应力-应变曲线皆呈弱软化型, 孔隙水压力先快速上升后逐渐趋于稳定; CSD 路径下维持偏应力为一常量, 施加孔隙水压力后的很长时间内试样变形很小, 当孔隙水压力增大至试验围压的 60%~75% 时, 试样迅速破坏。CSD 路径无偏应力峰值, 文中根据轴应变随平均有效应力变化曲线定义了等效峰值破坏线。通过对比发现, 2 种路径下饱和重塑黄土的有效峰值强度指标差异明显, 而有效残余强度指标相近, 表明有效残余强度指标是重塑黄土内在属性, 受应力路径的影响不大。该研究结果可为实际工程选取正确的应力路径试验提供参考。

关键词: 重塑黄土; 应力路径; 变形; 强度; 孔隙水压力

中图分类号: TU411.7

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2022)06-0074-07

Mechanical properties of saturated remolded loess under different stress paths

ZHAO Danqi^{1,2}, FU Yukai^{1,2}, HOU Xiaokun³, LI Tonglu^{1,2}, LI Ping^{1,2}, LI Yan^{1,2}, ZHANG Lin^{1,2}

(1. School of Geological Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710054, China;
2. Water Cycle and Geological Environment Observation and Research Station for the Chinese Loess Plateau,
Ministry of Education, Zhengning, Gansu 745399, China; 3. Institute of Geology and Geophysics, Chinese
Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

Abstract: The mechanical properties of soil often vary with stress state and stress paths. In order to investigate the mechanical properties of saturated soil under vertical loading and constant shear stress path, saturated remolded loess samples are prepared. Through consolidated undrained (CU) triaxial tests and constant shear stress drained (CSD) triaxial tests, the corresponding stress-strain curves, pore water pressure curves and stress path curves are measured. The results show that the saturated remolded loess has obviously different deformation characteristics under the two paths. In CU tests, the stress-strain curves are softening weakly. The pore water pressure rises

收稿日期: 2022-01-12; 修订日期: 2022-03-15

投稿网址: www.swdzcgdz.com

基金项目: 陕西省自然科学基金基础研究计划资助项目(2022JM-167); 国家自然科学基金项目(42072311); 国家自然科学基金重大项目(41790442)

第一作者: 赵丹旗(1998-), 女, 硕士研究生, 主要从事黄土强度及边坡稳定性研究。E-mail: zdq@chd.edu.cn

通讯作者: 付昱凯(1983-), 男, 博士, 讲师, 主要从事工程地质与地质灾害研究。E-mail: fw@chd.edu.cn

rapidly and tends to be stable gradually. In CSD tests, the deviator stress is a constant and the pore water pressure is applied. The deformation of samples is small for a long time at the beginning. When the pore water pressure increases to 60%–75% of the confining pressure, the samples are destroyed rapidly. Because there is no peak value of deviator stress in CSD path, the equivalent peak failure line is defined according to the axial strain-mean effective stress curves. By comparison, it is found that the effective peak strength indexes of the saturated remolded loess are significantly different under the two paths. However, the effective residual strength indexes are similar, indicating that the effective residual strength indexes are the internal attribute of the remolded loess and are not affected by the stress path. This study can provide reference for selecting the correct stress path test in practical engineering.

Keywords: remolded loess; stress path; deformation; strength; pore water pressure

土体的力学特性不仅取决于土体本身性质, 而且受到应力状态、应力路径等因素的影响, 因此实际工程中要尽量选择可真实反映土体应力状态、加载方式、排水条件的应力路径进行试验^[1-2]。

三轴试验可进行多种不同应力路径的试验, 通常采用的是围压或平均主应力增大、减小或不变的路径, 借此研究各类土体在不同应力路径下变形强度的差异^[3-6]。早期学者对砂土进行试验研究发现了应力路径对土体应力-应变特性的影响, 探讨了应力路径与本构模型的相关性^[7-8]。江美英等^[9]研究应力路径对饱和黄土孔隙水压力的影响, 结果显示常规压缩、减围压压缩和等平均主应力路径下孔压差别较大, 且轴向应变较小时孔压基本不受初始固结压力影响。许成顺等^[10]试验发现了砂土在压缩条件下的剪胀性比拉伸条件下大, 在减压压缩、常规压缩、增压压缩条件下的剪胀性依次减小, 在压缩路径下的内摩擦角比拉伸条件下小。

以上应力路径可以模拟实际工程中的加载、卸载过程, 而在边坡中常常遇到地下水位上升引起土体中应力路径变化的情况^[11-12]。Brand^[13]曾建议在室内试验中, 通过增加孔隙水压力来模拟降雨引起的边坡破坏过程, 即土体所受偏应力不变、平均有效应力减小的排水剪切路径。戴福初等^[14]利用该路径分析了雨水入渗条件下剪缩型、剪胀型和临界状态型土的应力-应变特点与滑坡发生机理的关系。Chu 等^[15]根据固结排水、固结不排水和常剪应力排水剪试验结果, 提出了一种用修正状态参数和临界状态线描述砂土失稳条件的方法。赵春宏等^[16]通过固结不排水和常剪应力排水剪试验, 分析了填土滑坡的发生机理, 结果显示该边坡是由于地下水位上升导致土体发生静态液化, 从而形成了流滑。董全杨等^[17]通过常剪应力排水剪试验验证了松散砂土在排水条件下会发生快

速塑性变形。上述常剪应力排水剪试验在砂土中开展比较广泛, 而黄土在该路径下的变形和强度特点仍需进一步研究。

我国黄土集中分布于陕西、甘肃、山西及宁夏地区^[18]。这些地区的黄土不仅是一种自然沉积物, 而且大量地作为土工材料, 如地基、路基和建设场地等的填料。在这些填筑工程中, 其含水率一般控制在最优含水率, 底部设有排水设施。然而, 随着时间推移, 自然降水、绿化人工灌溉引起地表水下渗、周围高地向地下汇水或排水设施老化造成堵塞, 会使地下水位不断上升, 孔隙水压力增大, 导致填土斜坡滑移, 甚至挡墙破坏, 将对正在运营的工程造成威胁。目前对这类由地下水位上升引起的滑坡机理研究多采用固结不排水试验, 然而常剪应力路径能更好地描述该类滑坡。因此, 本文制取饱和重塑黄土试样, 使用 GDS 三轴试验系统进行固结不排水(CU)和常剪应力排水剪(CSD)三轴试验, 分析 2 种路径下饱和重塑黄土的变形和强度特点, 以便为实际工程选取合理的变形和强度指标提供参考。

1 研究方法

1.1 试样制备

试验土样取自陕西延安新城北区某一填土边坡, 测得其比重为 2.71, 天然含水率为 10.0%, 液限为 28.5%, 塑限为 18.7%, 塑性指数为 9.8, 根据《土的工程分类标准》(GB/T 50145—2007), 定名为低液限黏土^[19]。用 Bettersize 2000 激光粒度分布仪测得土样粒径分布曲线如图 1 所示, 可见黏粒(≤ 0.005 mm)质量占比为 9.3%, 粉粒(0.005 ~ 0.075 mm)为 77.0%, 砂粒(0.075 ~ 2 mm)为 13.7%。黄土风干碾碎后过 2 mm 筛, 将筛下散土平铺于土工盘中, 按照制样含水率 10% 计算加水量并将水均匀喷洒在土样上, 用保鲜膜密封静置 24 h 后充

分拌匀,再置于保湿器中使土中水分布均匀。采用分层压制法制取干密度为 1.40 g/cm^3 、直径 $50 \text{ mm} \times$ 高 100 mm 的圆柱试样,制样孔隙比为 0.936 。

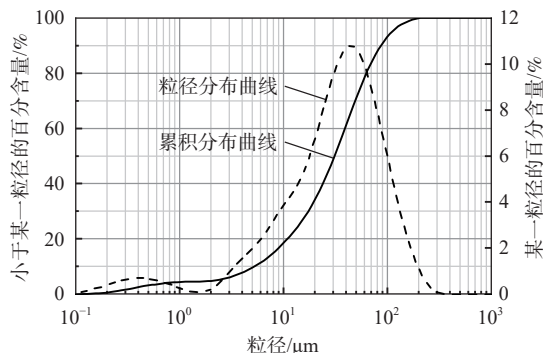


图 1 黄土试样粒径分布曲线

Fig. 1 Particle size distribution curve of the loess sample

1.2 试验方案

试验在 GDS 三轴试验系统上完成。试验前采用常水头渗透和反压饱和相结合的方法对试样进行饱和,具体为:对试样施加 20 kPa 围压和 10 kPa 反压,打开试样与外界相通的排水阀门,在常水头下形成稳定渗流,并带出土体内气体;待水连续均匀流出排气完

成后,关闭排水阀门;保持围压比反压大 10 kPa ,并以 1 kPa/min 的速率同步增加围压和反压,最终围压增加至 300 kPa 左右。孔压系数 $B(B=\Delta u/\Delta \sigma_c)$ 通过增加围压测定孔压的方式获得,当 $B \geq 0.98$ 说明试样饱和。

饱和完成后,进行 CU 或 CSD 试验。CU 试验包括等压固结和剪切,具体为:饱和完成后,维持反压不变,并以恒定速率增加围压,使有效固结应力分别达到 $60, 110, 210 \text{ kPa}$,但实际值略有偏差。等压固结完成后,关闭试样与反压控制器的连接阀门,将加载方式由应力控制转换为应变控制,并按 0.1 %/min 轴向应变速率进行剪切试验,试验结束的标准是轴向应变达到 25% 以上。

CSD 试验包括等压固结、偏压固结和常剪应力剪切。等压固结方法及有效固结应力设置同 CU 试验。等压固结完成后,保持试样与反压控制器的连接阀门开启,对试样进行偏压固结,加载速率按 0.01 %/min 轴向应变控制。当偏应力 q 达到设定值时进入常剪应力剪切阶段,该阶段偏应力保持不变,以 0.20 kPa/min 的速率增加反压,直至试样破坏。具体试验方案如表 1 所示。

表 1 试验方案
Table 1 Test schemes

试验编号	固结阶段			剪切阶段		
	固结方式	有效固结应力/kPa	偏压固结速率/($\text{%} \cdot \text{min}^{-1}$)	应变速率/($\text{%} \cdot \text{min}^{-1}$)	偏应力/kPa	孔压控制增速/($\text{kPa} \cdot \text{min}^{-1}$)
CU-1	等压固结	54	—	0.1	—	—
CU-2	等压固结	109	—	0.1	—	—
CU-3	等压固结	199	—	0.1	—	—
CSD-1	等压-偏压固结	61	0.01	—	20	0.20
CSD-2	等压-偏压固结	110	0.01	—	40	0.20
CSD-3	等压-偏压固结	210	0.01	—	60	0.20

2 试验结果分析

下面分析中,围压、轴向应变分别用 σ_c 、 ϵ_a 表示。平均应力 p 、平均有效应力 p' 、偏应力 q 的表达式如下:

$$\left. \begin{aligned} p &= \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \\ p' &= p - u \\ q &= \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: σ_1 、 σ_3 ——最大、最小主应力/kPa;

u ——孔隙水压力/kPa。

2.1 固结不排水路径下饱和重塑黄土的变形特点

图 2 为 CU 应力路径的试验结果。首先为等压排

水固结阶段,偏应力为 0,应力路径自原点沿 p 轴右移。然后进入应变控制不排水剪切阶段,总应力路径沿 45° 线上升到峰值偏应力,再原路返回到残余偏应力;有效应力路径随孔隙水压力不断增大而偏离总应力路径,在偏应力上升的同时,平均有效应力小幅增大后减小,偏应力达到峰值后开始下降,最后沿着破坏线继续下降。

图 3 中实线为不同围压下的应力-轴应变曲线。在 3 种围压下,曲线均呈弱软化型,即偏应力达到峰值后有小幅下降。以偏应力峰值为界,将曲线划分为 2 个阶段。第 1 阶段,偏应力随轴向应变的增大而陡升,围压越大增速越快,当轴向应变达到 1% 左右,

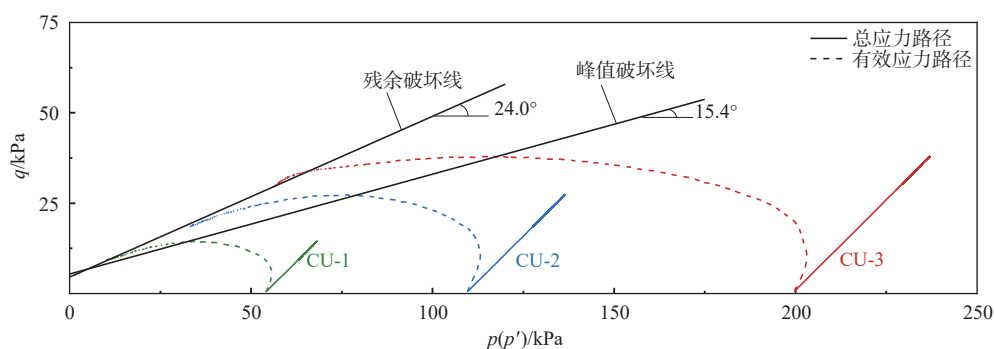


图2 CU 试验应力路径

Fig. 2 Stress path of the consolidated undrained tests

偏应力达到峰值。第2阶段, 偏应力随轴向应变的增大而缓慢下降, 当轴向应变达到15%时, 偏应力趋于稳定, 土体达到残余状态。偏应力峰值对应的应力状态点为峰值破坏点, 轴向应变25%时对应的应力状态点为残余破坏点, 用直线拟合即可得到峰值破坏线和残余破坏线^[20-21]。

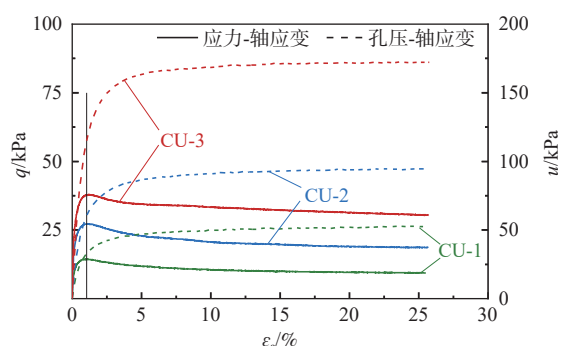
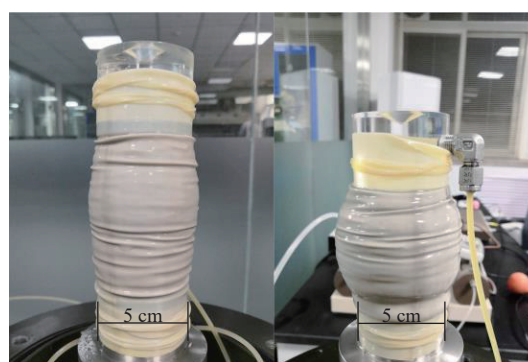
图3 应力 q 、孔压 u 与轴应变 ε_a 关系曲线Fig. 3 Curves of q - ε_a and u - ε_a

图3中虚线为孔隙水压力随轴应变的变化曲线。可以看出, 围压越大, 初始孔压随轴向应变的增速越快, 最终稳定值也越高。在偏应力达到峰值前孔压呈非线性快速增长, 孔压增速减缓时, 偏应力开始减小。当应变为5%时, 孔压趋于稳定。CU-1、CU-2、CU-3的孔压终值分别约为围压的98.1%、86.9%、86.5%, 也就是低围压下, 孔压几乎接近围压。孔压上升是土样应变软化的原因, 也表明土体在剪切阶段发生了剪缩。试样最终呈中部鼓胀破坏, 如图4(a)所示。

2.2 常剪应力路径下饱和重塑黄土的变形特点

图5中实线为CSD试验的应力路径, 虚线为轴应变随平均有效应力的变化曲线, 图6为孔隙水压力随轴应变的变化曲线。3种围压下的试验曲线形态一致, 故以CSD-3为例进行分析。

$O-A_3$ 和 A_3-B_3 段分别为等压和偏压固结阶段,



(a) CU路径 (应变25%) (b) CSD路径 (应变50%)

图4 2种应力路径下土样都呈现鼓胀破坏

Fig. 4 Swelling failure of the soil samples under both stress paths

都在排水条件下进行, 孔压接近0。应力路径先沿 p 轴右移, 再沿 45° 线到目标应力点。这2个阶段产生少量轴向变形, 围压越大变形越多。

B_3-D_3 段为常剪应力剪切阶段, 维持偏应力不变, 通过施加反压使平均有效应力减小, 应力路径水平左移达到破坏线。 C'_3 为 ε_a-p' 曲线开始出现上升趋势的临界点, 以此为界将常剪应力剪切阶段分为2段。 B_3-C_3 段, 随着孔压增大, 试样仍处于稳定状态, 几乎没有产生轴向变形。 C_3-D_3 段, 轴向变形加速发展, 试验过程中可观察到试样中部开始鼓胀。CSD-1、CSD-2、CSD-3 在 D_i ($i=1,2,3$) 点的应变分别为10.3%、15.4%、16.4%。3种围压下 C_i 、 D_i 点的孔隙水压力情况列于表2。

D_3-E_3 段为破坏阶段, 偏应力不能维持常数, 而是沿破坏线下降。该阶段轴向变形失控, 突然增长, 试样快速鼓胀破坏, 如图4(b)所示。

由于常剪应力剪切阶段偏应力为常数, 因此这里取 ε_a-p' 曲线开始出现上升趋势的临界点 C'_i 对应的平均有效应力点 C_i 为等效峰值破坏点, 其拟合直线即为

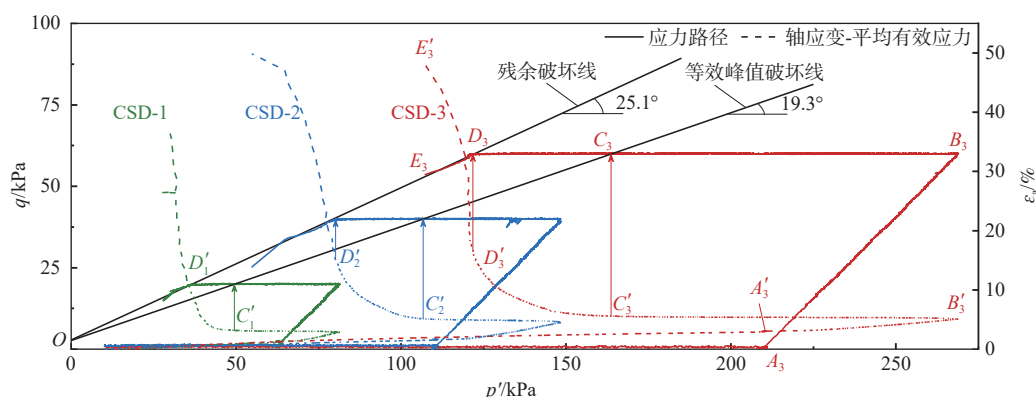


图 5 CSD 试验应力路径与轴应变-平均有效应力曲线

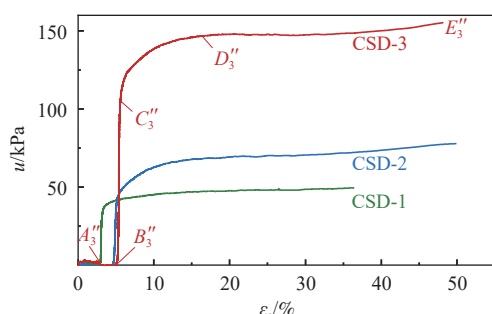
Fig. 5 Stress path of the constant shear drained tests and ε_a - p' curves

图 6 孔压-轴应变曲线

Fig. 6 Curves of u - ε_a 表 2 C_i 、 D_i 点的孔隙水压力Table 2 Pore water pressure at C_i and D_i

试验编号	$C_i(i=1,2,3)$		$D_i(i=1,2,3)$	
	u/kPa	$\frac{u}{\sigma_c}/\%$	u/kPa	$\frac{u}{\sigma_c}/\%$
CSD-1	32.0	52.5	45.4	74.4
CSD-2	41.5	37.7	67.9	61.7
CSD-3	105.1	50.0	147.1	70.0

CSD 路径的等效峰值破坏线。另外,取偏应力失稳下降点 D_i 为残余破坏点,从而确定残余破坏线的位置。

2.3 2 种应力路径下饱和重塑黄土的强度

图 2 和图 5 在 p - q 坐标上分别绘制了 2 种应力路径下的峰值和残余破坏线。将这 2 组强度破坏线放在同一个图上比较,如图 7 所示。再利用 p - q 坐标下

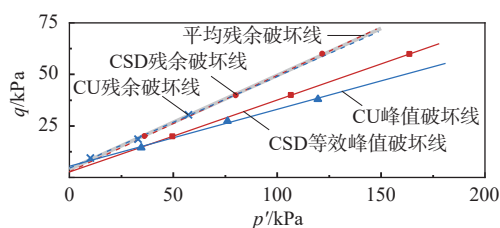


图 7 2 种应力路径的破坏线

Fig. 7 Failure lines of two stress paths

破坏线的倾角 α 和截距 a , 由式(2)求得相应的有效内摩擦角和有效黏聚力, 计算参数和计算结果汇总于表 3。

$$\left. \begin{aligned} \varphi' &= \arcsin(\tan \alpha) \\ c' &= \frac{a}{\cos \varphi'} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中: α ——破坏线与 p' 轴的夹角/ $^\circ$;

a ——破坏线在 q 轴上的截距;

φ' ——有效内摩擦角/ $^\circ$;

c' ——有效黏聚力/kPa。

表 3 2 种应力路径下饱和重塑黄土的有效抗剪强度指标

Table 3 Effective shear strength indexes of the saturated remolded loess under two stress paths

破坏线	应力路径	α	a	$\varphi'/(^\circ)$	c'/kPa
峰值破坏线	CU	15.4	5.4	16.0	5.6
	CSD	19.3	2.6	20.5	2.8
残余破坏线	CU	24.0	4.6	26.4	5.1
	CSD	25.1	2.8	27.9	3.2
平均残余破坏线	—	24.5	4.0	27.1	4.5

由图 7 可见, CSD 与 CU 路径下, 峰值破坏线的位置相差较大, 而残余破坏线的位置相差较小, 也就是说应力路径对有效峰值强度的影响比较大。换算为有效内摩擦角和有效黏聚力, 可见在 CSD 路径下的峰值内摩擦角比 CU 路径下大 4.5° , 残余内摩擦角比 CU 路径下大 1.5° , 峰值黏聚力、残余黏聚力比 CU 路径下小 2.8 kPa、1.9 kPa。2 种路径下土体有效残余强度指标的差异是缘于在各自独立的坐标下计算出来的。由图 7 可以看出, 2 种路径下的残余值散点几乎分布在 1 条直线上。将 2 种路径下的残余破坏点按 1 条直线统计, 可得其平均倾角和平均截距, 再由式(2)换算为 φ' 和 c' , 分别为 27.1° 和 4.5 kPa, 其值一并列于表 3 中。2 种应力路径下的有效残余强度很接近,

说明有效残余强度是重塑黄土的内在属性, 不受外在应力边界条件的影响。

3 结论

(1)CU 路径下, 孔隙水压力快速上升后趋于稳定, 试样因孔隙水压力升高而出现应变软化现象。

(2)CSD 路径下, 孔隙水压力增大初期, 试样几乎没有轴向变形, 当应力路径达到破坏线时, 偏应力失控下降, 试样快速鼓胀破坏。

(3)CSD 路径下偏应力不变, 将 ε_a-p' 曲线开始上升时对应的应力点作为等效峰值破坏点, 由此确定了 CSD 路径下的等效峰值破坏线。

(4)饱和重塑黄土在 2 种应力路径下有着明显不同的变形模式, 有效峰值强度也存在明显差异, 但其残余破坏线几乎重合, 有效残余强度指标差别不大, 说明有效残余强度是重塑黄土的内在属性, 与外在应力条件无关。

参考文献 (References) :

- [1] 李广信, 吕禾. 土强度试验的排水条件与强度指标的应用 [J]. 工程勘察, 2006, 34(3): 11 - 14. [LI Guangxin, LYU He. Drainage conditions for tests of soil strength and the application of strength indices [J]. Journal of Geotechnical Investigation & Surveying, 2006, 34(3): 11 - 14. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 陈存礼, 郭娟, 杨鹏. 应力路径对固结排水条件下饱和和原状黄土变形与强度特性的影响 [J]. 水利学报, 2008, 39(6): 703 - 708. [CHEN Cunli, GUO Juan, YANG Peng. Influence of stress path on deformation and strength characteristics of saturated intact loess under drainage condition [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 39(6): 703 - 708. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 刘恩龙, 沈珠江. 不同应力路径下结构性土的力学特性 [J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(10): 2058 - 2064. [LIU Enlong, SHEN Zhujiang. Mechanical behavior of structured soils under different stress paths [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(10): 2058 - 2064. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 曾玲玲, 陈晓平. 软土在不同应力路径下的力学特性分析 [J]. 岩土力学, 2009, 30(5): 1264 - 1270. [ZENG Lingling, CHEN Xiaoping. Analysis of mechanical characteristics of soft soil under different stress paths [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(5): 1264 - 1270. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 高彬, 陈筠, 杨恒, 等. 红黏土在不同应力路径下的力学特性试验研究 [J]. 地下空间与工程学报, 2018, 14(5): 1202 - 1212. [GAO Bin, CHEN Jun, YANG Heng, et al. Experimental study on mechanical properties of red clay under different stress paths [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2018, 14(5): 1202 - 1212. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 鄧彬, 王番, 胡梦玲, 等. 不同应力路径下饱和黄土应力应变及孔压特性分析 [J]. 科学技术与工程, 2016, 16(22): 244 - 248. [ZHI Bin, WANG Pan, HU Mengling, et al. The influence of different stress path on stress and strain relation and pore pressure characteristic of saturated loess [J]. Science Technology and Engineering, 2016, 16(22): 244 - 248. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 刘祖德, 陆士强, 杨天林, 等. 应力路径对填土应力应变关系的影响及其应用 [J]. 岩土工程学报, 1982, 4(4): 45 - 55. [LIU Zude, LU Shiqiang, YANG Tianlin, et al. The influence of stress path on the stress-strain behavior of earthfills and its application [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1982, 4(4): 45 - 55. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 孙岳崧, 濮家骊, 李广信. 不同应力路径对砂土应力-应变关系影响 [J]. 岩土工程学报, 1987, 9(6): 78 - 88. [SUN Yuesong, PU Jialiu, LI Guangxin. The influence of different stress path on the stress-strain relationships of sand [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1987, 9(6): 78 - 88. (in Chinese)]
- [9] 江美英, 骆亚生, 王瑞瑞, 等. 应力路径对饱和黄土孔压的影响研究 [J]. 地下空间与工程学报, 2010, 6(3): 498 - 502. [JIANG Meiyong, LUO Yasheng, WANG Ruirui, et al. Influence of stress path on the pore pressure of saturated loess [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2010, 6(3): 498 - 502. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 许成顺, 文利明, 杜修力, 等. 不同应力路径条件下的砂土剪切特性试验研究 [J]. 水利学报, 2010, 41(1): 108 - 112. [XU Chengshun, WEN Liming, DU Xiuli, et al. Experimental study on shear behaviors of sand under different stress path [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 41(1): 108 - 112. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 周飞, 许强, 巨袁臻, 等. 黑方台黄土斜坡变形破坏机理研究 [J]. 水文地质工程地质, 2017, 44(1): 157 - 163. [ZHOU Fei, XU Qiang, JU Yuanzhen, et al. A study

- of the deformation and failure mechanism of the Heifangtai loess slope[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2017, 44(1): 157 – 163. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 许强, 魏勇, 彭大雷, 等. 泾阳南塬蒋刘4#滑坡特征及成因机制[J]. *水文地质工程地质*, 2018, 45(1): 123 – 130. [XU Qiang, WEI Yong, PENG Dalei, et al. Characteristics and failure mechanism of the Jiangliu 4# landslide in the southern tableland in Jingyang County[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2018, 45(1): 123 – 130. (in Chinese with English abstract)]
- [13] BRAND E W. Some thoughts on rain-induced slope failure[C]//*Proceedings of 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*. Stockholm: A ABalkema, 1981: 373 – 376.
- [14] 戴福初, 陈守义, 李焯芬. 从土的应力应变特性探讨滑坡发生机理[J]. *岩土工程学报*, 2000, 22(1): 127 – 130. [DAI Fuchu, CHEN Shouyi, LI Zhuofen. Analysis of landslide initiative mechanism based on stress-strain behavior of soil[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2000, 22(1): 127 – 130. (in Chinese)]
- [15] CHU J, LEROUÉIL S, LEONG W K. Unstable behaviour of sand and its implication for slope instability[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2003, 40(5): 873 – 885.
- [16] 赵春宏, 戴福初. 深圳某填土滑坡破坏机理研究[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2007, 18(2): 1 – 8. [ZHAO Chunhong, DAI Fuchu. Study on failure mechanism of a fill slope in Shenzhen[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2007, 18(2): 1 – 8. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 董全杨, 蔡袁强, 王军, 等. 松散砂土不稳定性试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2014, 33(3): 623 – 630. [DONG Quanyang, CAI Yuanqiang, WANG Jun, et al. Experimental study of instability of loose sand[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2014, 33(3): 623 – 630. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 徐张建, 林在贯, 张茂省. 中国黄土与黄土滑坡[J]. *岩石力学与工程学报*, 2007, 26(7): 1297 – 1312. [XU Zhangjian, LIN Zaiguan, ZHANG Maosheng. Loess in China and loess landslides[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007, 26(7): 1297 – 1312. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 中华人民共和国建设部. 土的工程分类标准: GB/T 50145—2007[S]. 北京: 中国计划出版社, 2008. [Ministry of Construction of the People's Republic of China. Standard for engineering classification of soil: GB/T 50145—2007[S]. Beijing: China Planning Press, 2008. (in Chinese)]
- [20] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 土工试验方法标准: GB/T 50123—2019[S]. 北京: 中国计划出版社, 2019. [Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for geotechnical testing method: GB/T 50123—2019[S]. Beijing: China Planning Press, 2019. (in Chinese)]
- [21] 李广信, 张丙印, 于玉贞. 土力学[M]. 2版. 北京: 清华大学出版社, 2013. [LI Guangxin, ZHANG Bingyin, YU Yuzhen. Soil mechanics[M]. 2nd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2013. (in Chinese)]

编辑: 张明霞