

文章编号:1671-8879(2016)05-0060-07

## 泾阳南塬 $Q_2$ 黄土物理力学特性

段 钊<sup>1,2</sup>, 彭建兵<sup>2</sup>, 冷艳秋<sup>2</sup>

(1. 西安科技大学 地质与环境学院, 陕西 西安 710054; 2. 长安大学 地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054)

**摘 要:**黄土是中国西部常见的一种天然建筑材料,受形成环境影响,其物理力学性质在空间上表现出显著的差异性,研究典型黄土的物理力学性质,对区域工程建设具有一定借鉴意义。以陕西泾阳南塬典型斜坡中  $Q_2$  黄土为研究对象,通过激光粒度分析、土常规试验、X 射线衍射试验、渗透试验、三轴试验及环剪试验等方法,系统地研究了泾阳南塬  $Q_2$  黄土的物理力学特性。研究结果表明:泾阳南塬  $Q_2$  黄土具有一定的大孔隙结构,粒组成分以细粒组为主;天然含水率、密度及孔隙比随埋深呈规律性变化;黄土中原生矿物及次生矿物含量分别占到 50% 和 47%;塑限为  $(15.4 \pm 1.2)\%$ ,液限为  $(26.8 \pm 0.7)\%$ ;渗透性较低,具有各向异性,有效渗透系数为  $3.455 \times 10^{-4}$  cm/s;含水率对黄土的应力-应变关系、抗剪强度参数及破坏模式具有显著影响,塑限可视为黄土脆性与塑性变形的界限值;残余强度受剪切速率及法向应力影响较大,残余强度参数随剪切速率的增大而降低,与法向应力无关。

**关键词:**岩土工程;物理力学性质;剪切试验; $Q_2$  黄土;泾阳南塬

**中图分类号:** TU43; P642

**文献标志码:** A

## Physico-mechanical characteristics of $Q_2$ loess in South Plateau of Jingyang

DUAN Zhao<sup>1,2</sup>, PENG Jian-bing<sup>2</sup>, LENG Yan-qiu<sup>2</sup>

(1. College of Geology and Environment, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, Shaanxi, China;

2. School of Geology Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China)

**Abstract:** Loess is a kind of common natural building materials in western China. The physico-mechanical characteristics of loess show significant differences in space which is affected by forming environment. Physical-mechanical characteristics research of typical loess will provide a reference for regional engineering construction. The physico-mechanical characteristics of  $Q_2$  loess in typical slope of South Plateau of Jingyang were investigated by laboratory tests which include laser particle size analysis, soil convention experiment X-ray diffraction analysis, permeability test, triaxial shear test and ring shear test. The physico-mechanical characteristics of  $Q_2$  loess were systematically investigated. The results show that  $Q_2$  loess is a kind of special soil with large pore structure. Fine grains are the major component. The natural water content, density and void ratio of  $Q_2$  loess change regularly with depth. The weight percentage of primary minerals and secondary minerals are found to be 50% and 47%, respectively in loess. The plastic limit water content is  $(15.4 \pm 1.2)\%$  and the liquid limit water content is  $(26.8 \pm 0.7)\%$ .  $Q_2$  loess has the characteristics of lower permeability and anisotropy, and its effective permeability coefficient is  $3.455 \times 10^{-4}$  cm/s. The water content has remarkable impact on stress-strain

收稿日期:2016-03-29

**基金项目:**国家自然科学基金项目(41572287, 41302276);中国地质调查局项目(12120114036001);西部矿产资源与地质工程教育部重点实验室开放基金项目(310826151137)

**作者简介:**段 钊(1985-),男,陕西西安人,西安科技大学讲师,工学博士,长安大学博士后,E-mail:landsliders@126.com。

behaviors, shear strength parameters and failure mode. Plastic limit water content is considered as a threshold between brittle deformation and plastic deformation of  $Q_2$  loess. The residual strength is greatly influenced by shear rate and normal stress, and the residual strength parameters decrease with the increase of shear rate and have no relation with normal stress. 3 tabs, 10 figs, 20 refs.

**Key words:** geotechnical engineering; physico-mechanical characteristic; shear test;  $Q_2$  loess; South Plateau of Jingyang

## 0 引言

中国黄土分布面积约  $64 \times 10^4 \text{ km}^2$ , 占国土面积的 6.6%。因黄土具有独特的结构性和强烈的水敏性,黄土地区工程地质问题频繁发生,严重制约着人类工程活动与地质环境的和谐发展<sup>[1-2]</sup>。实践证明,深刻认识黄土的物理力学性质,对黄土地区的工程建设具有重要意义。为此,中国学者开展了大量研究工作。刘祖典等对中国黄土的地质特征和物理力学性质进行了分析,初步探讨了在不同应力状态下黄土的变形特征和湿陷性规律等<sup>[3]</sup>;李保雄等对兰州地区马兰黄土的工程地质性质进行了测试,系统研究了马兰黄土的物理力学特性,重点论述了马兰黄土的水敏性和抗剪强度的变化规律<sup>[4]</sup>;张志清等对高速路基黄土的颗粒组成、矿物成分及物理力学性质进行了试验研究,揭示了黄土路基湿陷性病害与各项物理力学指标之间的内在联系<sup>[5]</sup>;方祥位等对陕西蒲城  $Q_2$  原状黄土试样进行了三轴剪切试验,探讨了  $Q_2$  黄土的变形、强度和屈服特性<sup>[6]</sup>;梁德佩对盐镇至潼关隧道区的黄土进行了物理力学试验研究,得出其物理力学性质指标,并分析了各项物理指标对力学特性的影响<sup>[7]</sup>;何小亮等以泾阳南塬第 9 层黄土为研究对象,通过常规三轴试验探讨了不同含水率与不同围压状态下黄土剪切强度参数的变化规律<sup>[8]</sup>;邢鲜丽等对黄龙县  $Q_2$  黄土进行了含水率与围压正交的三轴固结不排水试验,探讨了含水率对抗剪强度的影响<sup>[9]</sup>;高建伟等对不同干密度与含水率的黄土试样进行了崩解试验,研究了重塑黄土的崩解特性及其与影响因素之间的联系<sup>[10]</sup>;Wen 等选取兰州地区黄土作为研究对象,分析了黄土的基本物理性质、矿物组成、可溶盐与碳酸钙含量,进一步通过剪切试验结果对比,探讨了饱和度、法向应力、结构等因素对黄土强度特征的影响<sup>[11]</sup>;Jiang 等对泾阳南塬黄土进行了不同应力路径下的剪切试验,分析了应力路径对于抗剪强度的影响,着重探讨了剪切试验前后原状黄土与重塑黄土的微观结构差异<sup>[12]</sup>;罗浩等对延安市赵家岸滑坡地区原状

马兰黄土进行了不同初始含水率条件下的三轴压缩试验,分析了抗剪强度参数随含水率降低的原因及对水的敏感性差异<sup>[13]</sup>。

陕西泾阳南塬位于渭河北岸咸阳凸起北缘泾阳段,主要出露第四系地层,从新到老分别为:全新统残积层( $Q_4^{\text{el}}$ )、晚更新统马兰黄土( $Q_3^{\text{col}}$ )、中更新统离石黄土( $Q_2^{\text{col}}$ )及早更新统离石黄土( $Q_1^{\text{col}}$ )<sup>[14]</sup>。其中中更新统离石黄土( $Q_2^{\text{col}}$ )作为构成斜坡的主要地层,包括 2~8 层黄土(L2~L8)及其间加有的古土壤,土厚约 40~60 m。近年来由于泾阳南塬地区(属西咸新区空港新城)工程建设频繁,大型公路、铁路及管线工程多依托于黄土而建, $Q_2$  黄土作为构成黄土斜坡的主要地层,其物理力学性质将直接影响到工程建筑的稳定<sup>[15]</sup>。为此,本文分别对泾阳县太平镇庙店村及蒋刘乡付家村典型黄土剖面进行勘测,共布设钻探点 6 处(各 3 处),坡面探槽 2 处,竖井 1 处,选取不同埋深重塑试样 152 组分别进行物理、水理性质、矿物成分及环剪剪切试验,制取原状试样 60 组分别进行渗透及三轴剪切试验,主要针对  $Q_2$  黄土开展相关物理力学特性的试验研究,以期对黄土地区工程建设提供一定的理论依据。

## 1 黄土物理性质

### 1.1 粒组成分与结构

以付家村剖面 2 号钻孔中  $Q_2$  黄土为例进行激光粒度分析与光学显微镜观察。结果表明, $Q_2$  黄土具有粒状骨架形态,且表现出大孔隙架空结构,这种结构类型在水的作用下易发生湿陷<sup>[16]</sup>。粒组成分以细粒组为主,其中粉粒含量较大,占 60% 以上;黏粒含量次之,介于 19.8%~31.5% 之间;仅含有少量砂砾,如下页图 1 所示。经过对比可知,研究区较以北地区  $Q_2$  黄土中黏粒含量有显著提高,符合黄土自西北向东南黏粒含量逐渐增大的规律,而黏粒含量的变化会对土体的物理力学性质造成显著影响<sup>[1,9,17]</sup>。

### 1.2 天然含水率

泾阳南塬地区受灌溉影响,不同塬段  $Q_2$  黄土

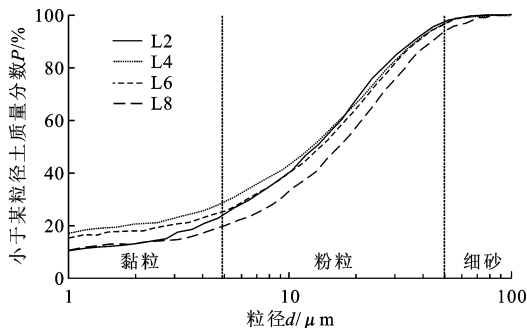


图1 黄土的粒组成分

Fig. 1 Particle size compositions of Q<sub>2</sub> loess

含水率变化较大,本文仅以付家村剖面 2 号钻孔中(每层黄土中部)黄土试样测试结果为例进行分析。如图 2 所示,Q<sub>2</sub> 黄土含水率一般高于 15%,随着深度的增加,含水率呈规律性增大。其中,L5 和 L9 层黄土分别受下伏古土壤层(S5)及黏土层隔水作用影响,含水率区间增幅较大。

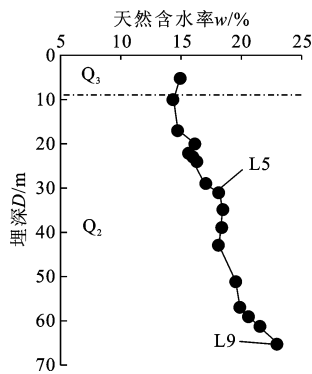


图2 黄土天然含水率随埋深变化曲线

Fig. 2 Change curve of natural water content of loess with depth

1.3 密度

密度是影响黄土物理力学性质的重要指标。以付家村剖面为例,Q<sub>2</sub> 黄土天然密度介于 1.71~2.05 g/cm<sup>3</sup>,平均值为 1.86 g/cm<sup>3</sup>;干密度介于 1.50~1.67 g/cm<sup>3</sup>,平均值为 1.58 g/cm<sup>3</sup>,如图 3 所示。根据试验结果可将 Q<sub>2</sub> 黄土的天然密度 ρ 与干密度 ρ<sub>d</sub> 分别表示为

ρ=0.005D+1.664 (1)

ρ<sub>d</sub>=0.002D+1.478 (2)

式中:D 为土体埋深(m)。

1.4 孔隙比

根据付家村剖面实测含水率及密度数据进行推导,获得 Q<sub>2</sub> 黄土的孔隙比一般在 0.62~0.81 之间,孔隙率在 38%~45%之间。试验结果表明,随着埋藏深度的增加,孔隙比逐渐减小,如图 4 所示。根据试验统计结果,Q<sub>2</sub> 黄土的孔隙比 e 为

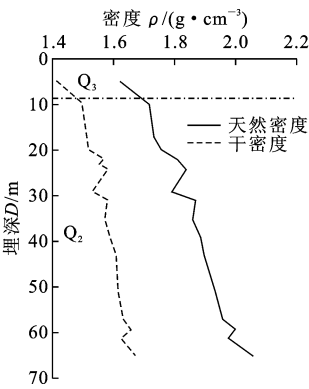


图3 黄土密度随埋深变化曲线

Fig. 3 Chang curves of loess density with depth

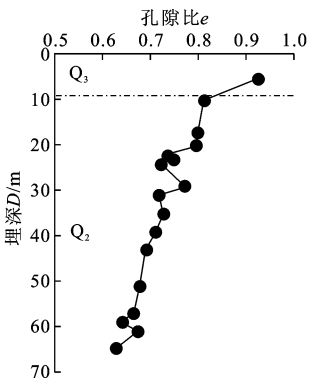


图4 黄土孔隙比随埋深变化曲线

Fig. 4 Chang curve of loess porosity with depth

e=0.83-0.003D (3)

2 黄土的矿物成分与水理性质

2.1 矿物成分

土的矿物成分决定土的物理力学性质,对土矿物成分的研究,有助于分析颗粒中矿物与孔隙溶液的相互化学反应以及对土物理力学性质的影响<sup>[18]</sup>。通过 X 射线衍射试验发现(表 1),泾阳南塬 Q<sub>2</sub> 黄土原生矿物含量与次生矿物含量相当,其中原生矿物含量占总矿物含量的 50%,次生矿物含量较高,占到 47%。次生矿物含量与亲水性关系密切,含量越大,亲水性就越强,结合水的储存能力就越高,对黄土的物理力学性质造成较大影响。

表 1 X 射线矿物衍射测试结果

Tab. 1 X-ray diffraction analysis results for materials of Q<sub>2</sub> loess

矿物成分	伊利石	蒙脱石	绿泥石	高岭石	石英	斜长石	钠长石	方解石	其他
含量/%	22	5	17	3	28	1	12	9	3

2.2 塑性

Q<sub>2</sub> 黄土的塑限为(15.4±1.2)%,液限为(26.8±0.7)%,天然状态下土体一般处于硬塑~坚硬状态。

按照塑性图的分类,Q<sub>2</sub> 黄土属于低塑性无机粘土。塑限和液限与土体中黏粒含量关系为

$$\omega_{\text{P}}=0.036q_{\text{c}}+14.81\% \tag{4}$$

$$\omega_{\text{L}}=0.145q_{\text{c}}+20.72\% \tag{5}$$

式中: $\omega_{\text{P}}$ 、 $\omega_{\text{L}}$  分别为塑限和液限(%); $q_{\text{c}}$  为黏粒的含量(%)。

### 2.3 渗透性

对 20 组不同埋深的坡面探槽原状 Q<sub>2</sub> 黄土试样进行渗透性试验,结果表明 Q<sub>2</sub> 黄土的各向渗透性具有显著差异,见表 2,垂直渗透系数明显高于水平渗透系数,渗透系数比率  $K_{\text{V}}/K_{\text{H}}$  约为 1.583, $K_{\text{V}}$  为垂直渗透系数, $K_{\text{H}}$  为水平渗透系数。随着深度的增大水平渗透系数和垂直渗透系数都略微降低,但渗透系数比率变化并不明显。

表 2 渗透系数统计

Tab. 2 Permeability coefficient statistics

渗透系数/(10 <sup>-4</sup> cm·s <sup>-1</sup> )			$K_{\text{V}}/K_{\text{H}}$
$K_{\text{H}}$	$K_{\text{V}}$	$K$	
1.845	2.921	3.455	1.583

注:表中数据为试验平均值。

有效渗透系数  $K$  为

$$K=\sqrt{K_{\text{V}}^2+K_{\text{H}}^2}=3.455\times10^{-4}\text{ cm/s} \tag{6}$$

## 3 黄土力学性质

### 3.1 抗剪强度与变形破坏特征

#### 3.1.1 应力-应变特征

通过探槽制取原状 Q<sub>2</sub> 黄土试样,采用自然风干和水膜迁移法配置 8 组含水率试样(8%、11%、13%、15%、17%、20%、23%、26%),分别在 50、100、150、200、250 kPa 围压下进行三轴固结不排水剪切试验。试样尺寸为  $\Phi 39.1\text{ mm}\times 80\text{ mm}$ ,剪切速率为 0.08 mm/min。试验结果如图 5 所示。

由图 5 可见,原状 Q<sub>2</sub> 黄土试样的应力-应变曲线特征受含水率影响比较显著。当含水率较低时,试样的应力-应变曲线表现为强软化型。在剪切的初始阶段,剪应力随着应变的增大而快速升高,该段曲线斜率很大,一般应变量在达到 2%之前,即可达到峰值强度。而后抗剪强度显著降低,试样突然破坏,这一过程十分短暂,反映出了干燥黄土脆性破坏的突然性和剧烈性。随着含水率的增大,试样脆性破坏特征减弱,应力应变关系逐渐由强软化型向弱软化型过渡,尤其是当含水率达到塑限后,这一变化尤为显著。此外,试样峰值强度也随含水率的降低而显著降低,其对应的应变量也逐渐减小。随着含

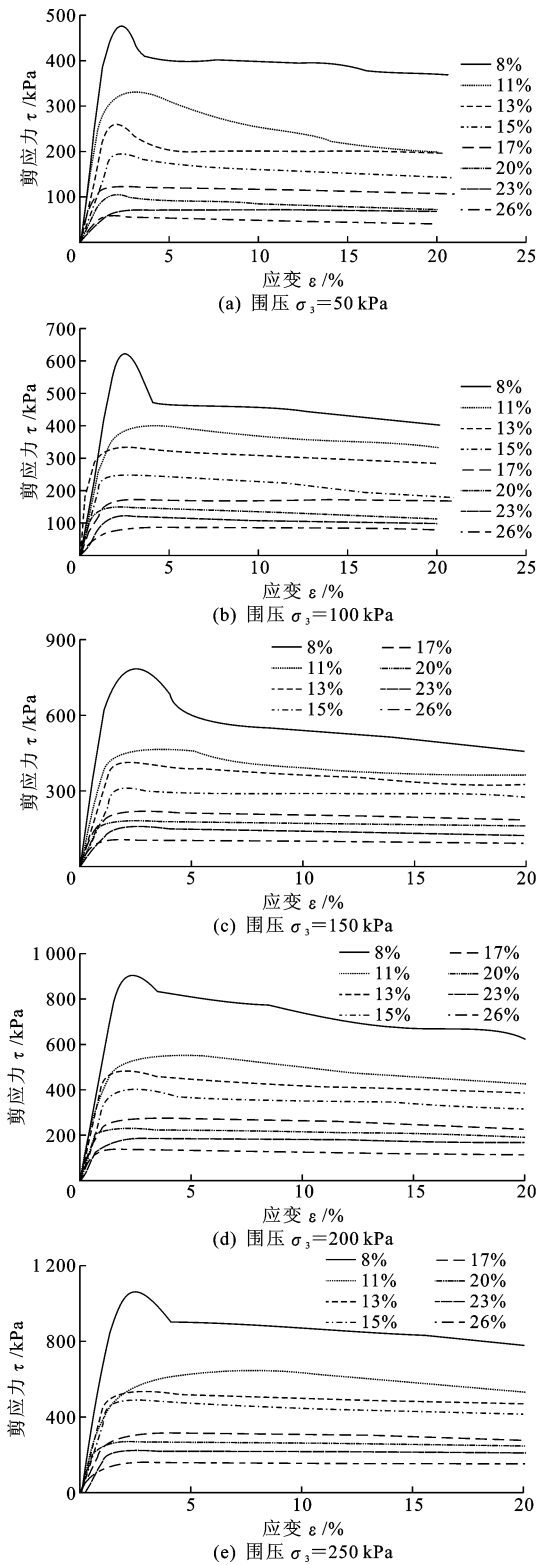


图 5 应力-应变曲线  
Fig. 5 Stress-strain curves

水率的进一步增大,试样完全表现为塑性破坏特征,峰值强度与残余强度十分接近。事实上,黄土的这种水敏性特点与其特殊的粒状骨架与架空结构在水的作用下发生破坏密切相关。

围压对应力-应变曲线形态无较大影响,随着围压的增大,试样峰值强度显著增高,峰值应变也越大。 $Q_2$  黄土的峰值强度-含水率-围压关系曲面如图 6 所示。

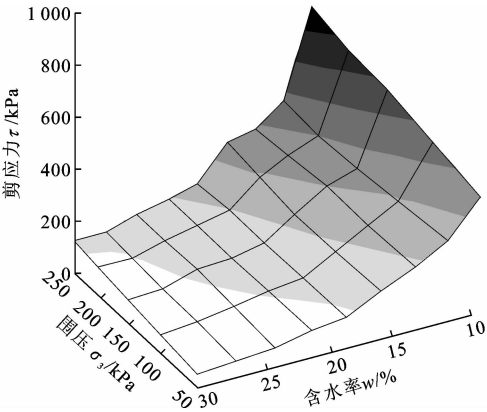


图 6 峰值强度-含水率-围压关系曲面

Fig. 6 Relationship among peak stress, moisture content and confining pressure

3.1.2 抗剪强度参数变化规律

如图 7 所示,随着含水率的增加,泾阳  $Q_2$  黄土的抗剪强度参数均表现为指数形式降低。当含水率较低时,粘聚力与内摩擦角降低较为明显;当含水率接近塑限时,曲线出现明显拐点;随着含水率的继续增大,粘聚力与内摩擦角降低趋势均减弱。对比可见,含水率对内摩擦角影响较小。

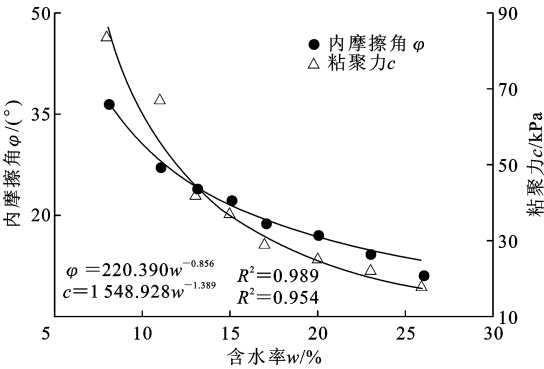


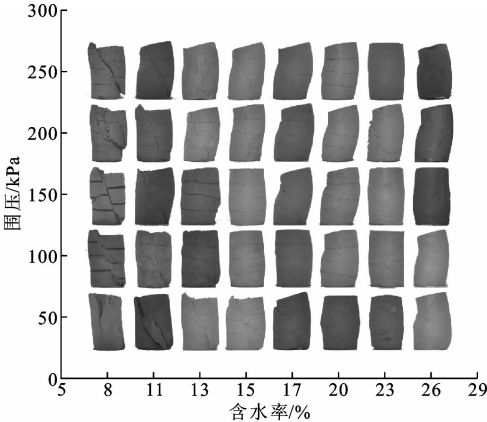
图 7 抗剪强度参数与含水率关系曲线

Fig. 7 Relationship curves between moisture content and shear strength parameters

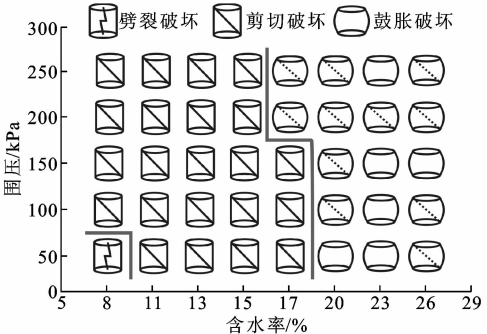
3.1.3 变形破坏模式

试样在三轴剪切应力状态下表现出 3 种破坏模式,即劈裂破坏、剪切破坏和鼓胀破坏,见图 8。劈裂破坏发生在低含水率和低围压条件下,因最小主应力方向拉应力较大,劈裂面沿最大主应力方向发展,应力-应变关系曲线呈强软化型;剪切破坏发生在中等含水率条件下,具有明显的剪切面,剪切面和最大主应力方向斜交,应力-应变关系曲线呈强软化

型或较强软化型;塑性破坏主要发生在高含水率(接近塑限)和高围压条件下,试样侧向发生显著的鼓胀变形,部分试样出现微弱的塑性剪切面,应力-应变关系曲线表现为较强软化型或弱软化型。



(a)  $Q_2$ 黄土试样三轴剪切破坏统计



(b) 不同含水率和围压条件下的试样破坏模式

图 8 试样破坏照片与破坏模式示意

Fig. 8 Diagram of failure photos and failure modes of specimens

3.2 残余强度特征

制取重塑饱和  $Q_2$  黄土试样,在法向应力分别为 100、200、300 kPa 条件下进行剪切速率为 130、260、390 mm/min 的固结不排水环剪试验。试验仪器采用 GTCS SRS-150 型环剪试验仪,外环直径 150 mm,内环直径 100 mm,有效试样面积为 98 cm<sup>2</sup>,试样高度为 25 mm。试验均采用单级加载。

如下页图 9 所示,法向应力变化对环剪曲线特征影响表现为,在相同的剪切速率条件下,随着法向应力的增大,相同剪切位移时所对应的抗剪强度也随之增大。

在控制法向应力条件下,变化剪切速率可以发现,剪切速率越快,试样的残余强度也越低,且法向应力越大,峰残强度差也越大。当剪切速率较慢(130 mm/min)时,环剪曲线均表现为应变硬化,在有限的位移条件下,残余强度不显著。说明在较慢的剪切速率条件下,剪切过程历时较长,剪应力有时间调整从而均匀分布,剪切面应力不集中,土体中凝

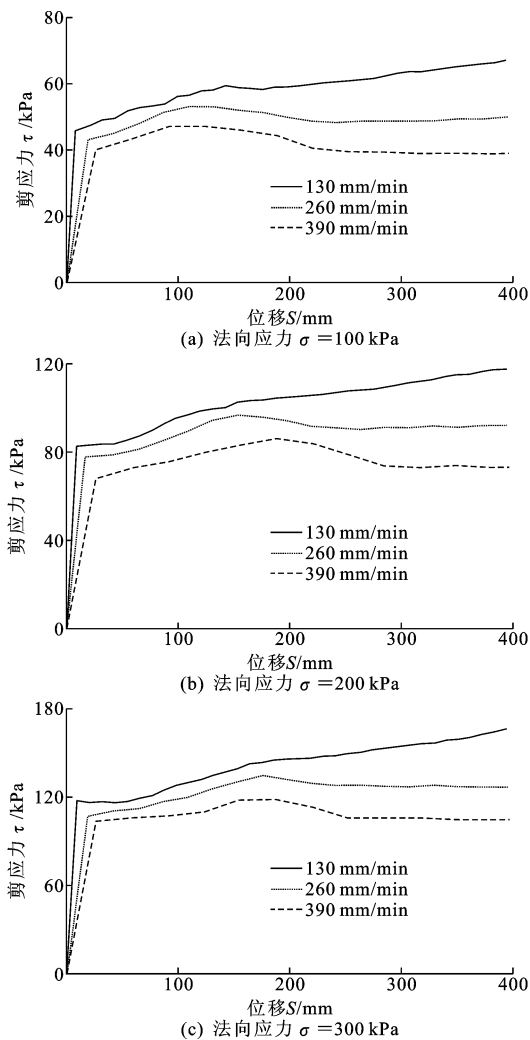


图 9 不同剪切速率下剪应力-剪切位移关系  
Fig. 9 Shear stress-shear displacement relationships  
curves at different shear rates

聚力和剪胀力得到了充分发挥;而剪切速率较快时,环剪曲线表现出应变软化特征,随着剪切面的完全贯通,土体抗剪强度显著降低,并形成稳定的残余强度。说明在快速剪切条件下,土体颗粒不仅产生滑移,而且会形成旋转、滚动等运动形式,土体结构快速破坏,土体颗粒形成定向排列,凝聚力和剪胀力消失,土体抗剪强度仅由摩擦力承担,结构强度无法恢复,因此在剪切过程中需要更多的形变调整以达到稳定状态<sup>[19]</sup>。

残余剪应力-法向应力关系曲线如图 10 所示。由曲线可知,饱和黄土试样的残余强度随法向应力的增大而增大,呈明显的线性关系,说明在同一级剪切速率条件下饱和黄土的抗剪强度参数(残余粘聚力  $c_r$  和残余内摩擦角  $\varphi_r$ )与法向应力无关<sup>[20]</sup>。随着剪切速率的增大,同一级法向应力下试样残余强度呈减小趋势,且法向应力越大这一趋势越显著,这一

规律说明剪切速率对残余强度参数产生了较大的影响。根据摩尔库伦强度准则对不同剪切速率下饱和黄土的残余强度参数进行拟合,得到黄土的残余粘聚力和残余内摩擦角,见表 3。

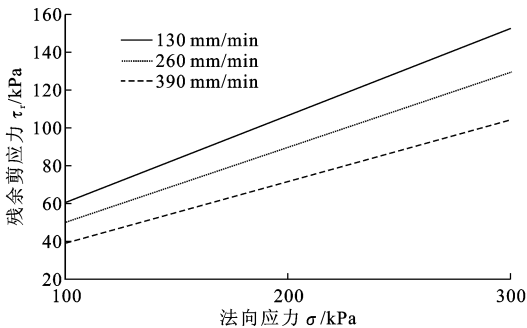


图 10 残余剪应力-法向应力关系  
Fig. 10 Residual strength-normal stress relationship

表 3 Q <sub>2</sub> 黄土残余强度参数			
Tab. 3 Residual strength parameters of Q <sub>2</sub> loess			
剪切速率/(mm·min <sup>-1</sup> )	130	260	390
$c_r$ /kPa	14.55	10.22	7.33
$\varphi_r$ / (°)	32	29	24

#### 4 结 语

(1)泾阳南塬 Q<sub>2</sub> 黄土具有一定的大孔隙结构,粒组成分以细粒组为主;天然含水率一般高于 15%,天然密度介于 1.71~2.05 g/cm<sup>3</sup> 之间,干密度介于 1.50~1.67 g/cm<sup>3</sup> 之间,孔隙比一般在 0.62~0.81 之间,以上指标随埋深增加呈规律性变化。

(2)泾阳南塬 Q<sub>2</sub> 黄土中原生矿物及次生矿物含量分别占到 50%和 47%;塑限在(15.4±1.2)%,液限在(26.8±0.7)%,天然状态下土体一般处于硬塑~坚硬状态;渗透性较低,具有各向异性,有效渗透系数为 3.455×10<sup>-4</sup> cm/s。

(3)泾阳南塬 Q<sub>2</sub> 黄土应力-应变关系表现为应变软化特征;含水率对黄土的抗剪强度参数及变形破坏特征影响较大,含水率较低时土体抗剪强度参数高且脆性特征显著,在低围压状态下土体表现为劈裂破坏;随着含水率的升高,土体脆性特征减弱,抗剪强度参数显著降低,土体表现为剪切破坏及鼓胀破坏。塑限可视作黄土脆性与塑性变形的界限值。黄土的残余强度受剪切速率及法向应力影响较大。残余强度参数随剪切速率的增大而降低,与法向应力无关。

(4)本文研究成果可为泾阳地区工程建设提供借鉴,下一步应在此基础上开展扫描电镜和压汞试验分析黄土微观结构,并通过应力路径控制下的三

轴剪切试验对比分析不同应力路径对抗剪强度特征的影响。

## 参考文献:

## References:

- [1] 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 Zhang-jian, LIN Zai-guan, ZHANG Mao-sheng. Loess in China and loess landslides[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2007,26(7):1297-1312. (in Chinese)
- [2] 雷祥义. 黄土高原地质灾害与人类活动[M]. 北京:地质出版社,2001.  
LEI Xiang-yi. Geological disasters and human actives on the loess plateau of China[M]. Beijing:Geological Publishing House,2001. (in Chinese)
- [3] 刘祖典,李靖. 黄土的物理力学性质和变形特性[J]. 第四纪研究,1986,7(1):1-9.  
LIU Zu-dian, LI Jing. Physico-mechanical properties and deformation characteristics of loess[J]. Quaternary Sciences,1986,7(1):1-9. (in Chinese)
- [4] 李保雄,牛永红,苗天德. 兰州马兰黄土的物理力学特性[J]. 岩土力学,2007,28(6):1077-1082.  
LI Bao-xiong, NIU Yong-hong, MIAO Tian-de. Physico-mechanical characteristics of Malan loess in Lanzhou region[J]. Rock and Soil Mechanics,2007,28(6):1077-1082. (in Chinese)
- [5] 张志清,金江,傅海滨. 湿陷性黄土路基物理力学性质试验研究[J]. 公路交通科技,2007,24(7):48-51.  
ZHANG Zhi-qing, JIN Jiang, FU Hai-bin. Physical-mechanical property study of subsidability for loess roadbed[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2007, 24(7): 48-51. (in Chinese)
- [6] 方祥位,陈正汉,申春妮,等. 原状  $Q_2$  黄土三轴剪切特性[J]. 岩石力学与工程学报,2008,27(2):383-389.  
FANG Xiang-wei, CHEN Zheng-han, SHEN Chun-ni, et al. Triaxial shear properties of undisturbed loess  $Q_2$ [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2008,27(2):383-389. (in Chinese)
- [7] 梁德佩. 浅谈黄土物理力学特性与湿陷性关系研究[J]. 地质灾害与环境保护,2010,21(4):100-103.  
LIANG De-pei. Study on the relationship between physical and mechanical properties and collapsibility of loess[J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2010, 21(4): 100-103. (in Chinese)
- [8] 何小亮,谢婉丽,丁勇. 泾阳南塬黄土剪切强度的三轴试验研究[J]. 工程地质学报,2010,18(增1):76-80,87.  
HE Xiao-liang, XIE Wan-li, DING Yong. Study on triaxial test of shear strength of loess in southern Jingyang County [J]. Journal of Engineering Geology, 2010,18(S1):76-80,87. (in Chinese)
- [9] 邢鲜丽,李同录,李萍,等. 黄土抗剪强度与含水率的变化规律[J]. 水文地质工程地质,2014,41(3):53-59.  
XING Xian-li, LI Tong-lu, LI Ping, et al. Variation regularities of loess shear strength with the moisture content[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2014,41(3):53-59. (in Chinese)
- [10] 高建伟,余宏明,钱玉智,等. 重塑黄土崩解特性试验研究[J]. 长江科学院院报,2014,31(10):146-150,155.  
GAO Jian-wei, YU Hong-ming, QIAN Yu-zhi, et al. Experimental study on disintegration characteristics of remolded loess[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2014, 31(10): 146-150, 155. (in Chinese)
- [11] WEN B P, YAN Y J. Influence of structure on shear characteristics of the unsaturated loess in Lanzhou, China[J]. Engineering Geology,2014,168:46-58.
- [12] JIANG M J, ZHANG F G, HU H J, et al. Structural characterization of natural loess and remolded loess under triaxial tests[J]. Engineering Geology, 2014, 181:249-260.
- [13] 罗浩,伍法权,王定伟,等. 赵家岸滑坡地区马兰黄土物理力学特性试验研究[J]. 工程地质学报,2015,23(1):44-51.  
LUO Hao, WU Fa-quan, WANG Ding-wei, et al. Physical and mechanical properties of Malan loess at Zhaojiaan landslide area [J]. Journal of Engineering Geology,2015,23(1):44-51. (in Chinese)
- [14] 孙建中. 黄土学[M]. 香港:香港考古学会出版社,2005.  
SUN Jian-zhong. Loessology[M]. Hong Kong:Hong Kong Archaeological Society,2005. (in Chinese)
- [15] XU L, DAI F C, THAM G L, et al. Landslides in the transitional slopes between a loess platform and river terrace, northwest China[J]. Environmental and Engineering Geoscience,2011,152(3):267-279.
- [16] 谢婉丽,王延寿,马中豪,等. 黄土湿陷机理研究现状及发展趋势[J]. 现代地质,2015,29(2):397-407.