

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2023.020



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



应力主轴变化对黄泛区粉质土各向异性特性的影响

曾长女¹, 马媛¹, 尹航¹, 谷贺¹, 王钰轲²

(1. 河南工业大学 土木工程学院, 郑州 450001; 2. 郑州大学 水利与土木工程学院, 郑州 450001)

摘要:为探究黄泛区粉质土在复杂应力状态下的各向异性特征,利用 GDS 空心圆柱系统开展排水条件下固定大主应力方向的剪切试验,获得黄泛区粉质土在不同中主应力系数 b 和大主应力方向角 α 下的应力-应变关系和剪应力比关系,研究其各向异性特征。结果表明:黄泛区粉质土八面体应力-应变、剪应力-大主应变受大主应力方向角 α 和中主应力系数 b 的影响作用较大;粉质土表现出较强的各向异性特征,尤其在 $b=0.5$ 和 1.0 时更为明显;试样的大主应变沿着 α 角发展为压缩状态,当 α 固定时, b 值越大,试样对应的峰值剪应力较小,试样在 $b=0.5$ 且 $\alpha=45^\circ$ 时的峰值剪应力 q 和对应的 ϵ_1 最大,相对于其他 b 值条件,当试样的 b 值固定在 0 、 α 固定在 45° 时,试样的平均峰值强度更大,这个规律对于 α 角也适用,且 $b=0.5$ 、 $\alpha=45^\circ$ 时的峰值剪应力比 q_t/p_0 最大。

关键词:粉质土;各向异性;应力-应变关系;主应力轴旋转;破坏强度

中图分类号:TU441 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(2025)03-0001-11

Influence of stress principal axis variation on anisotropic behavior of silty soil in the Yellow River flood area

ZENG Changnv¹, MA Yuan¹, YIN Hang¹, GU He¹, WANG Yuke²

(1. College of Civil Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, P. R. China; 2. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, P. R. China)

Abstract: A series of hollow cylinder torsion shear tests were conducted for the silty soil in the Yellow River flood area, considering the effect of drainage shearing with major large principal stress direction. The shear stress-strain behavior as well as the anisotropic characteristics of silty soil were investigated. Under different intermediate principal stress coefficients b and major principal stress direction angles α , the stress-strain relationship and the corresponding shear stress ratio of silty soil were obtained. It was concluded that the values of α and b have a significant effect on the octahedral stress-strain and the shear stress-major principal strain. The

收稿日期:2022-12-06

基金项目:国家自然科学基金(52109140);河南省科技攻关项目(212102110027);河南省科技研发计划联合基金项目(222103810075)

作者简介:曾长女(1978-),女,博士,教授,博士生导师,主要从事土动力学特性研究,E-mail:zengcnv@126.com。

王钰轲(通信作者),男,博士,教授,博士生导师,E-mail:ykewang@163.com。

Received: 2022-12-06

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (No. 52109140); Henan Province Key Specialized Research and Development Breakthrough Plan (No. 212102110027); Henan Province Joint Fund Project of Science and Technology (No. 222103810075)

Author brief: ZENG Changnv (1978-), PhD, professor, doctoral supervisor, main research interest: soil dynamic behavior, E-mail: zengcnv@126.com.

WANG Yuke (corresponding author), PhD, professor, doctoral supervisor, E-mail: ykewang@163.com.

obvious anisotropic behavior was observed, especially under $b=0.5$ or 1.0 . Compressed deformation generally occurred in the major principal strain direction. Under a fixed α , the smaller shear strength occurred under a larger b value. The peak shear strength and the corresponding axial strain were the greatest under the conditions of $\alpha=45^\circ$ and $b=0.5$, relevant with to the highest peak shear stress ratio q_t/p_0 .

Keywords: silty soil; anisotropy; stress-strain relationship; rotation of principal stress axis; failure strength

黄泛区大量基础设施分布在粉土地基之上,该地区粉土具有高分散性、低黏结性和弱可塑性的特点,难以压实且水稳性较差,给当地基础设施的修建与维护带来极大困扰。由于黄泛区粉土的特殊沉积历史,土体在复杂应力作用下表现出明显的各向异性^[1],产生了许多强度和变形破坏等工程问题。

目前,有不少学者对砂土^[2-5]和黏土^[6-9]的各向异性开展了研究,发现土体的孔压、应力-应变关系等力学特征都与中主应力系数 b 以及大主应力方向角 α 有关。除此之外,也有学者对其他土体开展了研究^[10-12]。其中, Ahmad 等^[10]对颗粒橡胶砂混合料的应力性能进行了研究。沈扬等^[11]通过南海钙质砂定轴剪切试验发现,破坏时各应变分量随 α 角变化呈现出不同的变化规律。Zamanian 等^[12]对不同颗粒级配的砂类土开展了扭剪、剪切不排水试验。以上研究表明, b 和 α 均对土体的应力-应变曲线、破坏强度和各向异性特征等有明显影响。

但对于粉质土复杂应力的各向异性研究较少,现有研究多集中于常规三轴试验^[13-21]。杨迎晓等^[14]采用常规三轴仪探讨钱塘江非饱和粉土的应力-应变性状和剪胀特性。张坤勇等^[15]采用 GDS 准应力路径三轴试验仪进行研究,发现土体的应力-应变特性与应力路径密切相关。陈存礼等^[16]采用多功能三轴试验机对黄河岸滩饱和粉土在不排水条件下进行单调加载、循环荷载后单调加载的三轴试验。刘晖等^[17]对含砂粉土试样进行不固结不排水三轴试验,得出冻融循环后土体应力-应变关系曲线、破坏强度、抗剪强度等参数的变化规律。石兆丰等^[18]通过三轴固结不排水剪切试验研究不同冻融循环次

数下黄河堤岸粉土应力-应变关系及抗剪强度的变化规律。杨庆等^[19]对非饱和重塑粉土进行三轴试验,研究不同围压、不同吸力下试样的抗剪强度及偏应力值。张俊峰等^[22]通过不排水单调剪切试验探究了主应力方向对饱和重塑粉土应力-应变关系及有效应力路径等的影响,对排水条件并未做阐述,但排水和不排水条件对饱和土体的应力-应变、强度等特性的影响有很大差异^[23-24]。

综上所述,对于粉质土的相关研究多集中在常规三轴试验下的不排水剪切试验,获得的强度变形参数难以反映黄泛区粉质土的实际工况。笔者利用空心圆柱扭剪仪进行排水试验,考虑不同中主应力系数和大主应力方向角影响下的土体应力-应变关系,探究其各向异性特征。

1 试验方案

1.1 试验设备

所用仪器为英国 GDS 空心扭剪仪系统,包括压力室、轴向和扭转驱动装置、内外围压及反压控制器、测试系统、控制系统等。由伺服步进马达实现内、外围压独立控制,仪器可直接测试试样上的轴向力、扭剪力以及轴向应变、扭剪应变等。

1.2 试样及其受力状态

试验用土为取自郑州地铁轨道交通 1 号线的粉质土。试验用土的物理性质指标如表 1 所示。试样为内外直径分别为 60 mm 和 100 mm、高度为 200 mm 的空心圆柱样。试样制备时采用落砂法,分 10 层制备。

表 1 粉质土基本物理性质指标

Table 1 Basic physical properties of silty soil

比重 G_s	密度 $\rho/(\text{g}/\text{cm}^3)$	最大孔隙比 e_{\max}	最小孔隙比 e_{\min}	颗粒百分比 %			
				0.5~0.25 mm	0.25~0.075 mm	0.075~0.005 mm	<0.005 mm
2.63	1.64	0.93	0.51	10.37	47.09	32.88	9.96

GDS 空心扭剪系统通过施加轴向力 W 、扭矩 T 、内围压 p_i 和外围压 p_o 的耦合作用产生相应的应力分量,空心圆柱样的应力-应变状态如图 1 所示。

试样各应力分量计算式^[25]为

$$\sigma_z = \frac{W}{\pi(r_o^2 - r_i^2)} + \frac{P_o r_o^2 - P_i r_i^2}{(r_o^2 - r_i^2)} \quad (1)$$

$$\sigma_r = \frac{P_o r_o + P_i r_i}{(r_o + r_i)} \quad (2)$$

$$\sigma_\theta = \frac{P_o r_o - P_i r_i}{(r_o - r_i)} \quad (3)$$

$$\tau_{z\theta} = \frac{3T}{2\pi(r_o^3 - r_i^3)} \quad (4)$$

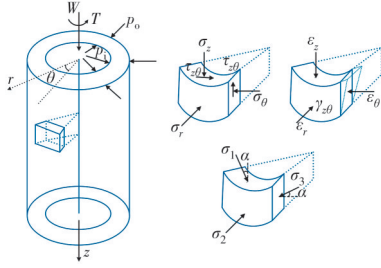


图1 空心圆柱试样的应力-应变状态

Fig. 1 Stress and strain states in hollow cylinder specimen

式中: σ_z 、 σ_r 、 σ_θ 和 $\tau_{z\theta}$ 分别为轴向应力、径向应力、环向应力和剪切应力。 r_i 、 r_o 分别为试样的内径和外径。在试验过程中,空心圆柱试样产生的大主应力 σ_1 、中主应力 σ_2 和小主应力 σ_3 则由各应力分量作用得到,其定义^[25]为

$$\sigma_1 = \frac{\sigma_z + \sigma_\theta}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_z - \sigma_\theta}{2}\right)^2 + \tau_{z\theta}^2} \quad (5)$$

$$\sigma_2 = \sigma_r \quad (6)$$

$$\sigma_3 = \frac{\sigma_z + \sigma_\theta}{2} - \sqrt{\left(\frac{\sigma_z - \sigma_\theta}{2}\right)^2 + \tau_{z\theta}^2} \quad (7)$$

其各应力分量对应的大主应变 ϵ_1 、中主应变 ϵ_2 、小主应变 ϵ_3 定义^[25]为

$$\epsilon_1 = \frac{\epsilon_z + \epsilon_\theta}{2} + \sqrt{\left(\frac{\epsilon_z - \epsilon_\theta}{2}\right)^2 + \gamma_{z\theta}^2} \quad (8)$$

$$\epsilon_2 = \epsilon_r \quad (9)$$

$$\epsilon_3 = \frac{\epsilon_z + \epsilon_\theta}{2} - \sqrt{\left(\frac{\epsilon_z - \epsilon_\theta}{2}\right)^2 + \gamma_{z\theta}^2} \quad (10)$$

式中:土单元产生的应变分量 ϵ_z 、 ϵ_r 、 ϵ_θ 、 $\gamma_{z\theta}$ 分别为轴向应变、径向应变、环向应变和剪应变。

在试验剪切阶段通过系统设定平均主应力 p 、剪应力 q 的加载速率、中主应力系数 b 以及大主应力方向角 α 可得到不同复杂应力路径。各参数定义^[25]为

$$p = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) = \frac{1}{3}(\sigma_r + \sigma_z + \sigma_\theta) \quad (11)$$

$$q = \left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}\right) = \sqrt{\left(\frac{\sigma_z - \sigma_\theta}{2}\right)^2 + (\tau_{z\theta})^2} \quad (12)$$

$$\alpha = \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{2\tau_{z\theta}}{\sigma_z - \sigma_\theta}\right) \quad (13)$$

$$b = \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3} = \frac{\sigma_r - (\sigma_z + \sigma_\theta)/2 + \sqrt{(\sigma_z - \sigma_\theta)^2/4 + \tau_{z\theta}^2}}{2\sqrt{(\sigma_z - \sigma_\theta)^2/4 + \tau_{z\theta}^2}} \quad (14)$$

通过控制这几个参数实现试验设计的应力路径,并按图2所示试验应力路径进行排水条件下的

粉质土定向剪切试验。

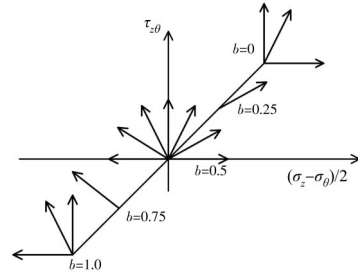


图2 定向剪切试验的应力路径

Fig. 2 Shear scheme in HCA stress path test series

1.3 试验方案

为了模拟工程现场的实际情况,使用土样的深度约9 m,计算围压为150 kPa,所有试样进行等向固结时的有效围压取为150 kPa。为使试样在加载过程中排水充分,控制剪切速率为2 kPa/min,具体试验方案如表2所示。试验采用应力控制方式,考虑不同大主应力方向角 α 、中主应力系数 b 的影响,在每组试验过程中控制 p 、 b 值和 α 角不变,逐渐增加剪应力 q ,使试样从应力状态点坐标(0,0)分别沿着设定的理论主应力方向剪切,直至破坏,实测应力路径如图3所示。由图3可以看出,在试验过程中,仪器能较好地实现设计的应力路径。

表2 定向剪切试验方案

Table 2 Directional shear test schemes

编号	控制参数		
	p/kPa	b	$\alpha/(^\circ)$
101	150	0	0
102	150	0	30
103	150	0	45
201	150	0.5	0
202	150	0.5	15
203	150	0.5	30
204	150	0.5	45
205	150	0.5	60
206	150	0.5	75
207	150	0.5	90
301	150	1.0	45
302	150	1.0	60
303	150	1.0	90
401	150	0.25	30
501	150	0.75	60

2 试验结果分析

2.1 粉质土三维应力-应变特性分析

为了更好地表述空心试样应力主轴方向固定下定向剪切试验的应力-应变状态,综合考虑轴向、

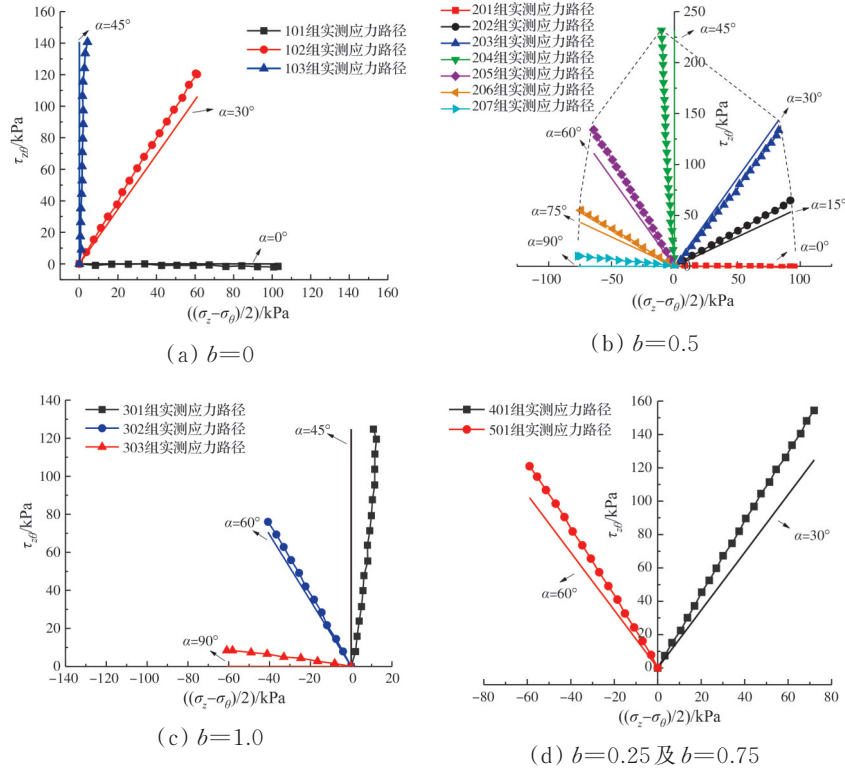


图 3 定向剪切试验实测与理论的应力路径

Fig. 3 Measured stress path of directional shear test

径向和扭剪等的共同作用,参照 Zdravkovic 等^[26]的研究,采用八面体剪应力 τ_{oct} 和八面体剪应变 γ_{oct} 来描述复杂应力状态下饱和粉质土的应力-应变状态,其中

$$\gamma_{\text{oct}} = \frac{2}{3} \cdot$$

$$\sqrt{(\epsilon_z - \epsilon_r)^2 + (\epsilon_r - \epsilon_\theta)^2 + (\epsilon_\theta - \epsilon_z)^2} + \frac{3}{2} \gamma_{z\theta}^2 \quad (15)$$

$$\tau_{\text{oct}} = \frac{1}{3} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2} \quad (16)$$

对于土体在复杂应力路径下的破坏标准,目前有许多学者提出了不同看法。沈扬等^[27]认为,当原状黏土的八面体剪应变达到 5% 时,已基本发挥完土体的强度,因此,选取八面体剪应变的 5% 作为土体破坏的标准;刘红等^[28]基于对重塑黄土进行的定向剪切试验,提出以八面体剪应变的 15% 作为重塑黄土的破坏标准。根据试验数据发现,粉质土试样在剪切过程中的八面体剪应变达到 10% 时,试样各应变分量曲线已相对平缓,因此,选取八面体剪应变 $\gamma_{\text{oct}} = 10\%$ 作为粉质土试样的破坏标准。

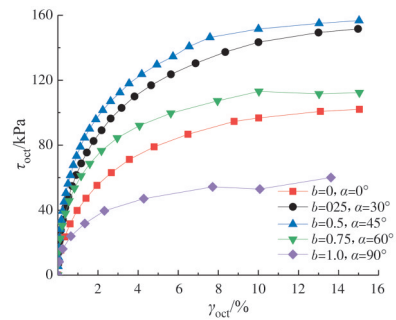
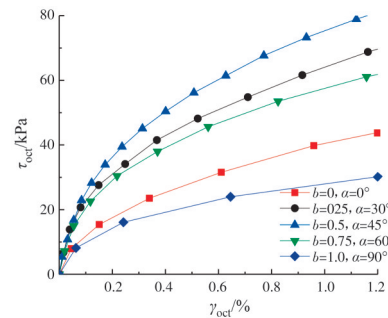
2.1.1 内外围压相等 ($b = \sin^2 \alpha$) 时粉质土应力-应变特征分析

当试样的内外围压相等时, $\sigma_r = \sigma_\theta$ 。若不施加扭转力,水平向的应力 (σ_r, σ_θ) 就与 σ_2, σ_3 相等;施加扭转力后可得 $\sigma_r = \sigma_2$,通过摩尔圆可以计算出 σ_1 与

σ_3 。此时中主应力系数 b 与大主应力方向角 α 呈一一对应的关系,Geiger 等^[29]得到了式 (17) 所示表达式。

$$b = \sin^2 \alpha \quad (17)$$

在内外围压相等的条件下, $b = 0, 0.25, 0.5, 0.75, 1.0$ 时的八面体剪应力-应变关系曲线如图 4

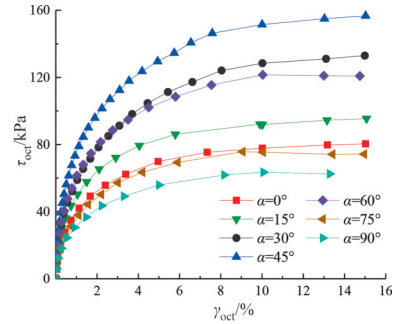
(a) $b = \sin^2 \alpha$ (b) $b = \sin^2 \alpha$ (加载初期放大图)图 4 $b = \sin^2 \alpha$ 时粉质土八面体剪应力-应变关系Fig. 4 Octahedral stress-strain for $b = \sin^2 \alpha$

所示,根据式(17),对应的大主应力方向角分别为 $\alpha=0^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ 。图4(b)为相应试样在加载初期的八面体剪应力-应变关系。在八面体剪应力-应变曲线发展初期, $\tau_{\text{oct}} \leq 10 \text{ kPa}$,各曲线各向异性特征不明显,在 $10 \text{ kPa} \leq \tau_{\text{oct}} \leq 20 \text{ kPa}$ 时, $b=0, \alpha=0^\circ, b=1.0, \alpha=90^\circ$ 两试样与 $b=0.25, \alpha=30^\circ, b=0.5, \alpha=45^\circ, b=0.75, \alpha=60^\circ$ 试样的割线模量开始出现差异,有明显的各向异性特征。随着 b 从0升高至0.5,达到相同值时八面体剪应变 γ_{oct} 所需的八面体剪应力 τ_{oct} 越来越高,在 $b=0.5, \alpha=45^\circ$ 时,八面体剪应力达到峰值; b 从0.5升至1.0,达到相同值八面体剪应变 γ_{oct} 所需的八面体剪应力 τ_{oct} 越来越低,在 $b=1.0, \alpha=90^\circ$ 时,八面体剪应力达到谷值,此时相当于常规拉伸试验,由于粉质土竖向为沉积方向,所以轴向拉伸刚度较小,所得破坏强度最小。

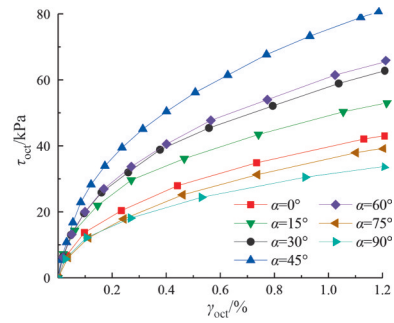
2.1.2 不同 α 角下粉质土应力-应变特征分析

图5~图7给出了粉质土试样在 $b=0, 0.5, 1.0$ 时不同 α 角下的八面体剪应力-应变关系曲线。从图中可以看出,在中主应力系数 b 固定时,不论 α 角如何变化,试样的八面体剪应力-应变曲线的整体发展规律基本相同,表现出延伸性的破坏特性,即在剪切初期阶段的应变发展速率较慢,随着剪应力 q 的不断增大,应力-应变曲线逐渐变缓,应变速率逐渐增大,粉质土试样的强度逐渐丧失,且在不同 b 值

下表现出不同的应力-应变关系。如图5所示,在 $b=0$ 时, $\alpha=30^\circ$ 和 $\alpha=45^\circ$ 下的八面体剪应力-应变曲线初期发展规律基本一致,而 $\alpha=0^\circ$ 下曲线发展差异较大,八面体剪应变 γ_{oct} 发展速率更快,各向异性特征表现明显。



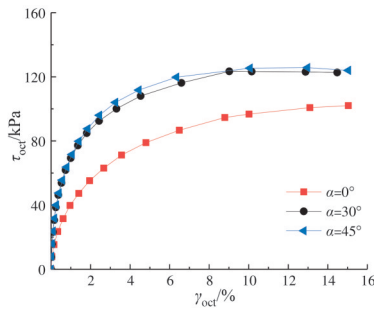
(a) $b=0.5$



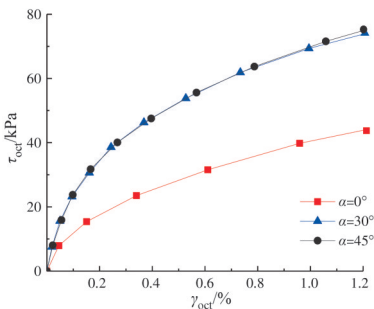
(b) $b=0.5$ (加载初期放大图)

图6 $b=0.5$ 时不同 α 粉质土八面体剪应力-应变关系

Fig. 6 Octahedral stress-strain under different α for $b=0.5$



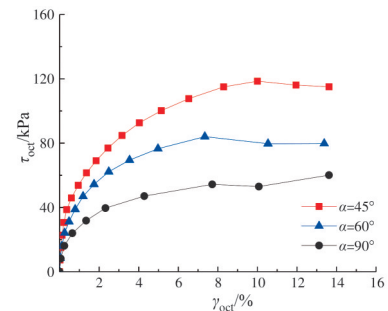
(a) $b=0$



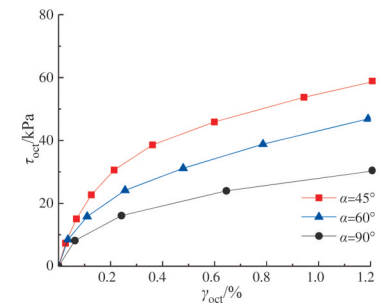
(b) $b=0$ (加载初期放大图)

图5 $b=0$ 时不同 α 角下粉质土八面体剪应力-应变关系

Fig. 5 Octahedral stress-strain under different α for $b=0$



(a) $b=1.0$



(b) $b=1.0$ (加载初期放大图)

图7 $b=1.0$ 时不同 α 下粉质土八面体剪应力-应变关系

Fig. 7 Octahedral stress-strain under different α for $b=1.0$

在 $b=0.5, 1.0$ 时, 各试样在加载初期表现出较大差异, 各组试样在不同 α 角下 γ_{oct} 的发展速率均有差距。由此看出, $b=0.5, 1.0$ 对试样各向异性特征的影响程度大于 $b=0$, 且在 $b=0.5$ 时各向异性表现更明显, 这与 Wang 等^[30] 对于温州软黏土的研究结论基本一致。由图 5~图 7 可以看出, 无论 $b=0, 0.5$ 或 1.0 , $\alpha=45^\circ$ 与 $\alpha=0^\circ$ 间和 $\alpha=45^\circ$ 与 $\alpha=90^\circ$ 间展现出的各向异性特征比 $\alpha=45^\circ$ 时与其他角度间展现出的各向异性特征更明显。这是因为, 当大主应力方位角 $\alpha=45^\circ$ 时, 试样受纯扭作用, 轴向应力 σ_z 几乎为零; 当大主应力方位角 α 为 $0^\circ, 90^\circ$ 时, 试样分别表现为受压和受拉, 扭转应力 τ_{θ} 为零, 若轴向应力大小相同, α 为 $0^\circ, 90^\circ$ 时的轴向应变 ϵ_z 基本相等^[30]。

2.1.3 不同 b 值下粉质土应力-应变特征分析

根据式 (14), 考虑到 $b=0$ 时 $\sigma_2 = \sigma_3$, 而 $b=0.5$ 时 $\sigma_2 \neq \sigma_3$ 。通过对比发现不同 b 值下粉质土试样从应力-应变关系角度表现出的各向异性特点, 以此判断 b 值对粉质土各向异性的影响。图 8~图 12 给出了在不同大主应力方向角 α 为 $0^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ 和 90° 时, 不同 b 值的八面体剪应力-应变关系曲线。当 $b=0, 0.25$ 时, 中主应变为负值; 当 $b=0$ 时, 试样处于常规三轴应力状态, 中主应力方向上的变形速率较快, 试样抵抗变形的能力较弱^[31], 所以在 $b=0$ 时达到同一应变值所需的剪应力较小。当 $b=0.25$ 时, 变形速率降低; 当 $b=0.5$ 时, 中主应变略大于零, 近似保持恒定^[31], 即达到同一应变值时 $b=0.5$

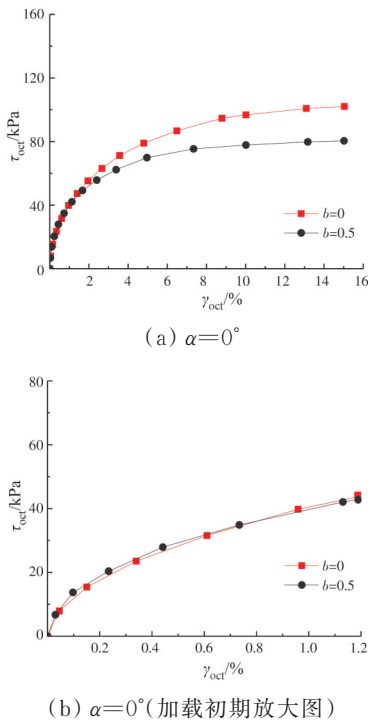


图 8 $\alpha=0^\circ$ 时不同 b 值粉质土八面体剪应力-应变关系

Fig. 8 Octahedral stress-strain under different b for $\alpha=0^\circ$

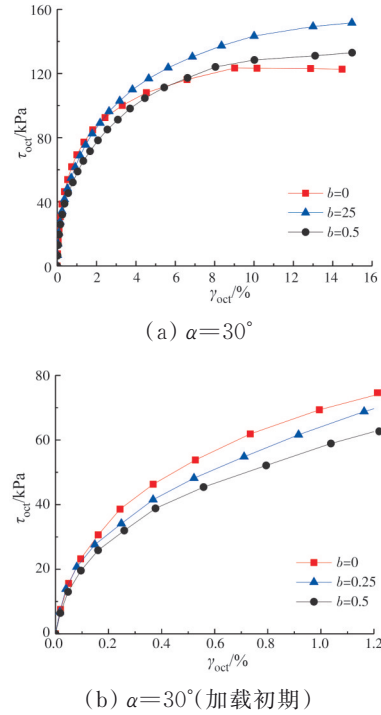


图 9 $\alpha=30^\circ$ 时不同 b 值粉质土八面体剪应力-应变关系

Fig. 9 Octahedral stress-strain under different b for $\alpha=30^\circ$

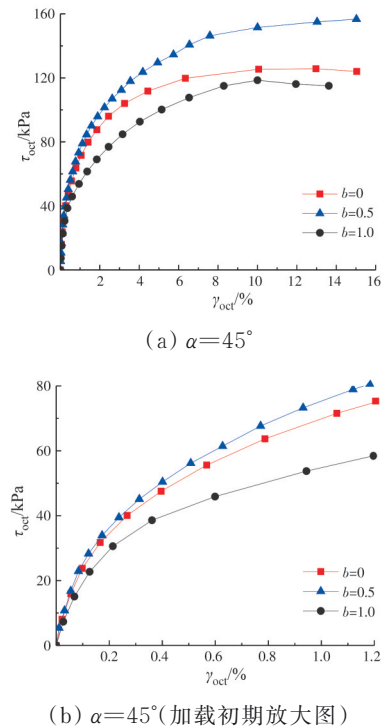
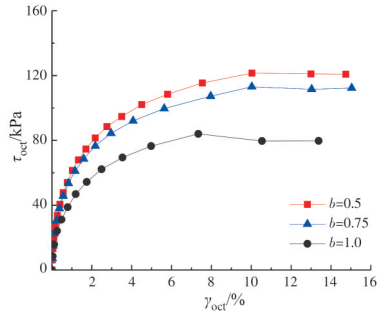
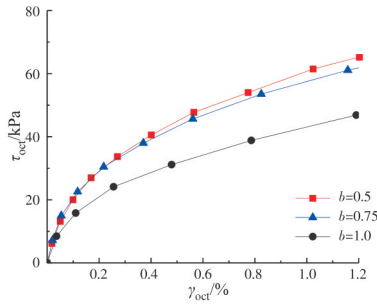
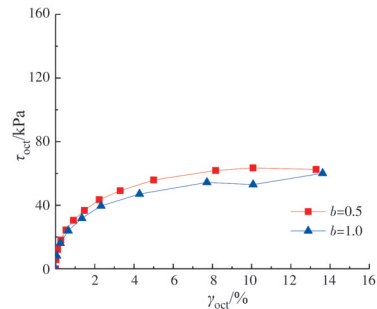
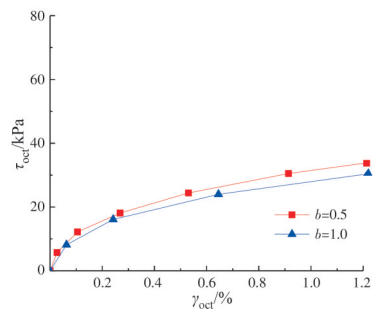


图 10 $\alpha=45^\circ$ 时不同 b 值粉质土八面体剪应力-应变关系

Fig. 10 Octahedral stress-strain under different b for $\alpha=45^\circ$

所需的剪应力最大。当 $b=0.75, 1.0$ 时, 中主应变为正值, 表现为收缩变形, 且随着 b 的增加, 中主应力的约束作用逐渐增强, 试样的变形速率增大^[31], 即达到同一应变值 $b=1.0$ 所需的剪应力小于 $b=0.75$ 。

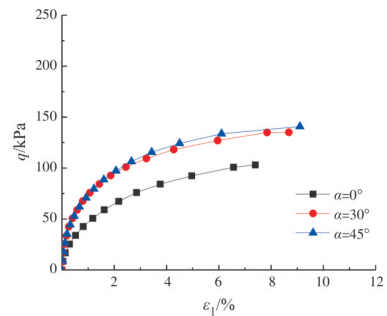
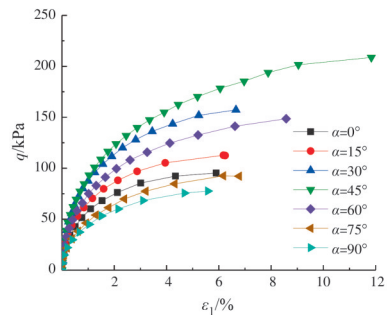
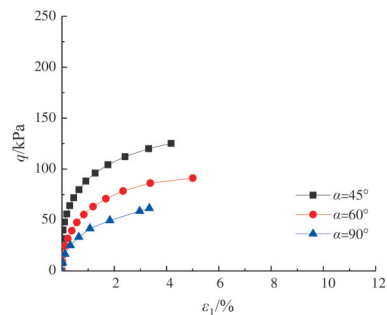
(a) $\alpha=60^\circ$ (b) $\alpha=60^\circ$ (加载初期放大图)图 11 $\alpha=60^\circ$ 时不同 b 值粉质土八面体剪应力-应变关系Fig. 11 Octahedral stress-strain under different b for $\alpha=60^\circ$ (a) $\alpha=90^\circ$ (b) $\alpha=90^\circ$ (加载初期)图 12 $\alpha=90^\circ$ 时不同 b 值粉质土八面体剪应力-应变关系Fig. 12 Octahedral stress-strain under different b for $\alpha=90^\circ$

在剪切初期试样的剪切模量基本相同,未表现出明显的各向异性,即 b 值对试样的各向异性影响较小,随着加载的进行,试样的剪切模量随着 b 值的增加而减小,八面体应力-应变曲线的发展规律表现不同,这是由于土体沉积,不同的方向有不同的强度和变形。在 $\alpha=0^\circ, 90^\circ$ 时,在剪切初期的较长一段

时间里,试样八面体剪应力-应变关系基本一致,而在 $\alpha=30^\circ, 45^\circ$ 和 60° ,应变为 0.1% 时,各试样曲线的发展趋势开始出现差异,不同 b 值时各向异性差异表现较大,且当 α 角固定不变时, b 值大的试样达到破坏条件时所需的剪应力较小。

2.2 粉质土剪应力-大主应变关系分析

为了研究大主应变随剪应力发展的变化趋势,图 13 给出了 b 值为 0、0.5、1.0 时试样在不同 α 下剪应力 q 随大主应变 ϵ_1 的变化曲线。从图中可以看出,所有试样的大主应变均呈压缩状态。在中主应力相同的情况下,在 α 为 $0^\circ \sim 45^\circ$ 时, α 越大,相同大主应变值所对应的剪应力值越大, α 为 $45^\circ \sim 90^\circ$ 时, α 越大,对应的剪应力值越小。在剪切初期,不同 α 试样各向异性表现不明显,随着剪切的进行,试样的各向异性特征在不同试验条件下表现出的差异逐渐明显。从图中可看出,粉质土在 $b=0.5, 1.0$ 时表

(a) $b=0$ (b) $b=0.5$ (c) $b=1.0$ 图 13 $b=0, 0.5, 1.0$ 不同 α 剪应力-大主应变关系Fig. 13 Deviator stress-major principal strain under different α for $b=0, 0.5, 1.0$

现出的各向异性特征更强,这与郭林等^[32]对温州软黏土的研究结论相似,而温州软黏土在 $\alpha=45^\circ$ 时相同大主应变值对应的剪应力则较小。

图 14 为 $\alpha=30^\circ、45^\circ、60^\circ$ 条件下剪应力与大主应变在不同 b 值时的变化曲线。在相同大主应变值下,施加的剪应力基本相同。而在剪切后期,试样在相同应变下所需的剪应力随着 b 值的增加呈先上升后下降的发展规律, $b=0.5$ 时为规律变化点。 $\alpha=45^\circ$ 时,当剪应力 $q<50$ kPa 时,中主应力系数 b 的变化对试样割线剪切模量几乎没有影响,随着剪应力的增加, $b=0.5$ 时试样割线剪切模量变化更为

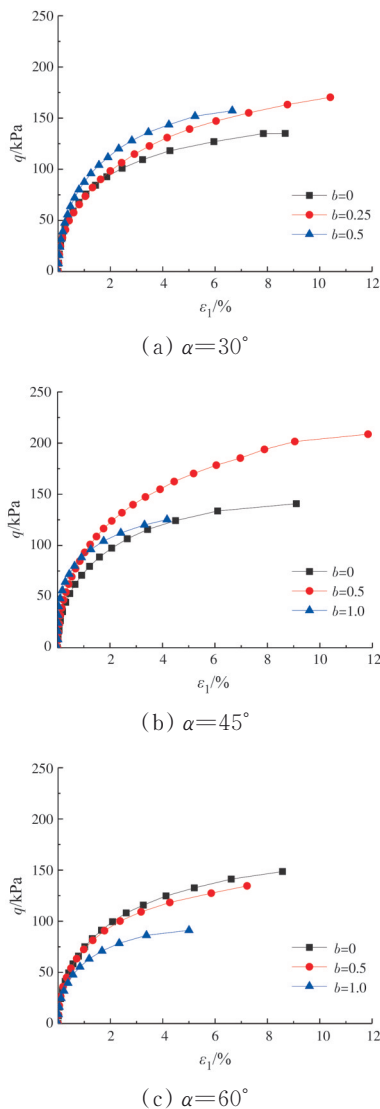


图 14 $\alpha=30^\circ、45^\circ、60^\circ$ 时不同 b 值的剪应力-大主应变关系

Fig. 14 Deviator stress-major principal strain under different b for $\alpha=30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$

明显,各向异性更大,且在 $b=0.5、\alpha=45^\circ$ 时试样破坏时产生的大主应变 ϵ_1 和剪应力 q 都最大。

2.3 粉质土的破坏强度特征

图 15 给出了试样在不同 b 值和不同 α 角下的峰值剪应力比 q_t/p_0 的对比曲线,其中 p_0 为初始有效平

均主应力,即 $p_0=150$ kPa, q_t 为试样破坏时的峰值剪应力。从图 15(a)可以看出,在控制 b 值不变的条件下,在 $\alpha<45^\circ$ 时试样峰值剪应力比随着 α 角的增大而增大,在 $\alpha>45^\circ$ 时峰值剪应力比却随着 α 角的增大而减小。而在相同 α 角条件下, $b=0.5$ 时的峰值剪应力比普遍大于 $b=0、1.0$ 时,在图 15(b)中也可以得到类似的结论。这是因为,在轴向扭转耦合作用下, $b=1.0$ 时, $\sigma_1=\sigma_2$,此时试样受拉应力和扭转力的同时,内、外围压也在同时变化,因此,此时 q_t/p_0 值相对较小。且在 $b=0.5$ 时峰值剪应力比随着 α 变化的升降幅度最大,由此可知, $b=0.5$ 时剪切强度表现出更明显的各向异性。因此,通过该对比可以看出, b 值和 α 角对粉质土在剪切强度特性上的各向异性特征影响也较大。

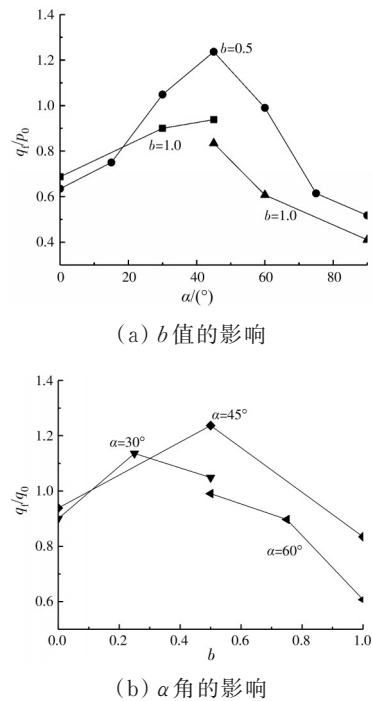
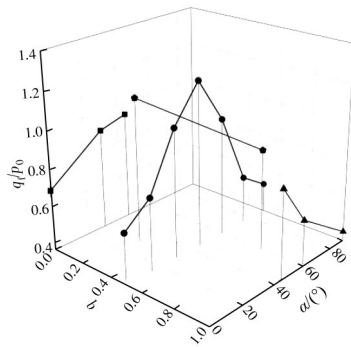


图 15 不同 b 值和 α 角下试样剪应力比变化曲线

Fig. 15 Shear stress ratio plotted versus principle stress directions and different b -values

为了便于综合观察剪应力比随 b 值和 α 角的变化规律,图 16 给出了粉质土试样剪应力比的三维试验结果,从图中可以看出,试样在 $b=1.0、\alpha=90^\circ$ 时的剪应力比最小,此时试验为常规拉伸试验,比 $b=0、\alpha=0^\circ$ 时的剪应力比还要小,此时试验为常规压缩试验,由此可见,粉质土试样的压缩强度比拉伸强度大,这也是粉质土各向异性的体现。

在 $b=0.5$ 的条件下,粉质土峰值剪应力比与相同条件下 Miura 等^[2]和熊焕^[33]对日本标准丰浦砂的试验结果对比如图 17 所示。由图 17 可以看出,黄泛区粉质土的峰值剪应力比随 α 变化的升降幅度比

图16 剪应力比随 b 值和 α 角变化的规律Fig. 16 Shear stress ratio as a function of b -values and α development law of angle change

日本标准丰浦砂大,且剪切强度最低点和最高点对应的 α 角与丰浦砂均不同,强度特性表现出较大差异。

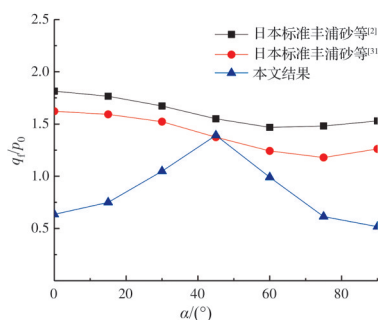


图17 剪应力比结果对比

Fig. 17 Comparison results of shear stress ratio

3 结论

通过空心圆柱扭剪仪对排水条件下的饱和粉质土试样加载不同的应力路径,对粉质土的变形特性和强度特性等力学特性进行研究,得到以下主要结论:

1)在中主应力系数 b 固定时,变化 α 角,试样的八面体剪应力-应变曲线整体的发展规律基本相同。试样在 $b=0.5$ 、 1.0 时,八面体剪应力-应变曲线表现出的各向异性比 $b=0$ 更明显。

2)当 α 角固定不变时,试样在剪切初期的剪切模量基本相同,未表现出明显的各向异性,随着加载的进行,试样的八面体应力-应变曲线的发展规律表现不同,表现出各向异性特征, b 值大的试样达到破坏条件时所需的剪应力基本较小。

3)试样的大主应变表现为压缩状态,且在 b 为 0.5 、 1.0 时各向异性特征更明显;在 α 角固定时,试样在剪切初期呈现出几乎相同的剪切模量,且在 $b=0.5$ 、 $\alpha=45^\circ$ 时试样破坏时的 q 和 ϵ_1 最大。

4)粉质土在不同 b 值和 α 角下表现出不同的强度特征。试样在 $b=0.5$ 时的峰值剪应力比 q_i/p_0 普遍大于 $b=0$ 、 1.0 时。试样在 $b=0.5$ 、 $\alpha=45^\circ$ 时峰值

剪应力比最大, $\alpha<45^\circ$ 时,随着 α 角的增大,其峰值剪应力增大, $\alpha>45^\circ$ 时则相反;在单独控制 $b=0.5$ 或 $\alpha=45^\circ$ 不变时,试样的平均峰值强度比其他条件下试样平均峰值强度大,该特征与丰浦砂有较大差异。

参考文献

- [1] 徐东升,汪稔,孟庆山,等.黄河三角洲粉土原位力学性能试验研究[J].岩石力学与工程学报,2010,29(2):409-416.
- [2] XU D S, WANG R, MENG Q S, et al. Experimental research on in situ mechanical properties of silt in Yellow River Delta [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(2): 409-416. (in Chinese)
- [3] MIURA K, MIURA S, TOKI S. Deformation behavior of anisotropic dense sand under principal stress axes rotation [J]. Soils and Foundations, 1986, 26(1): 36-52.
- [4] RABBI A T M Z, RAHMAN M M, CAMERON D A. Undrained behavior of silty sand and the role of isotropic and K_0 consolidation [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2018, 144(4): 04018014.
- [5] ZAMANIAN M, PAYAN M, JAFARZADEH F, et al. Evolution of dynamic properties of cross-anisotropic sand subjected to stress anisotropy [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2021, 147(7): 04021048.
- [6] LIAO D, YANG Z X. Hypoplastic modeling of anisotropic sand behavior accounting for rotation of principal stress direction [J]. Journal of Engineering Mechanics, 2022, 148(10): 04022060.
- [7] WANG Y K, GAO Y F, LI B, et al. Influence of initial state and intermediate principal stress on undrained behavior of soft clay during pure principal stress rotation [J]. Acta Geotechnica, 2019, 14(5): 1379-1401.
- [8] WANG Y K, GUO L, GAO Y F, et al. Anisotropic drained deformation behavior and shear strength of natural soft marine clay [J]. Marine Georesources & Geotechnology, 2016, 34(5): 493-502.
- [9] ZHUANG H, HU X Q, GUO L, et al. Effect of initial deviatoric stress on anisotropy of marine clay during principal stress rotation [J]. Marine Georesources & Geotechnology, 2022, 40(1): 64-77.
- [10] ZHUANG H, LI M F, WANG C L, et al. The effects of initial deviatoric stress on anisotropy of marine clay and strain components [J]. Marine Georesources & Geotechnology, 2021, 39(10): 1167-1176.
- [11] AHMAD A, FAKHARIAN K. Effect of stress rotation and intermediate stress ratio on monotonic behavior of granulated rubber-sand mixtures [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2020, 32(4): 04020047.

- [11] 沈扬, 梁晖, 葛华阳, 等. 主应力轴变化下各向异性钙质砂的定轴剪切特性[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(增刊 1): 22-26.
SHEN Y, LIANG H, GE H Y, et al. Fixed-axis shear characteristics of anisotropic calcareous sand under variation of principal stress axes [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(Sup 1): 22-26. (in Chinese)
- [12] ZAMANIAN M, JAFARZADEH F. Experimental study of stress anisotropy and noncoaxiality of dense sand subjected to monotonic and cyclic loading [J]. Transportation Geotechnics, 2020, 23: 100331.
- [13] YOSHIKAWA T, NODA T, KODAKA T. Effects of air coupling on triaxial shearing behavior of unsaturated silty specimens under constant confining pressure and various drained and exhausted conditions [J]. Soils and Foundations, 2015, 55(6): 1372-1387.
- [14] 杨迎晓, 龚晓南, 范川, 等. 钱塘江冲海积非饱和粉土剪胀性三轴试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(增刊 1): 38-42, 94.
YANG Y X, GONG X N, FAN C, et al. Triaxial testing study of dilatant characteristics of Qiantangjiang alluvial unsaturated silts [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(Sup 1): 38-42, 94. (in Chinese)
- [15] 张坤勇, 李广山, 梅小洪, 等. 基于 K_0 固结排水卸荷应力路径试验粉土应力-变形特性研究[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(7): 1182-1188.
ZHANG K Y, LI G S, MEI X H, et al. Stress-deformation characteristics of silty soil based on K_0 consolidation and drainage unloading stress path tests [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(7): 1182-1188. (in Chinese)
- [16] 陈存礼, 马少雄, 李雷雷, 等. 饱和黄河岸滩粉土循环荷载后的变形强度特性[J]. 水利学报, 2014, 45(7): 801-808.
CHEN C L, MA S X, LI L L, et al. Study on post-cyclic undrained deformation and strength characteristics of saturated silt in the floodplain of the Yellow River [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 45(7): 801-808. (in Chinese)
- [17] 刘晖, 刘建坤, 邵博文, 等. 冻融循环对含砂粉土力学性质的影响[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2018, 50(3): 135-142.
LIU H, LIU J K, TAI B W, et al. Mechanical properties changes of sandy silt due to freeze-thaw cycles [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2018, 50(3): 135-142. (in Chinese)
- [18] 石兆丰, 牟献友, 冀鸿兰, 等. 冻融循环下黄河堤岸粉土力学特性及应力-应变归一化分析[J]. 干旱区资源与环境, 2021, 35(9): 126-134.
SHI Z F, MOU X Y, JI H L, et al. Mechanical properties and normalized stress-strain behaviour of Yellow River embankment silt under freezing-thawing cycle [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2021, 35(9): 126-134. (in Chinese)
- [19] 杨庆, 王猛, 栾茂田, 等. 非饱和粉土静、动强度对比试验研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(1): 71-75, 80.
YANG Q, WANG M, LUAN M T, et al. Experimental research of correlation on static and dynamic strength of unsaturated silty clay [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(1): 71-75, 80. (in Chinese)
- [20] ZHANG D, LI Q M, LIU E L, et al. Dynamic properties of frozen silty soils with different coarse-grained contents subjected to cyclic triaxial loading [J]. Cold Regions Science and Technology, 2019: 157: 64-85.
- [21] LI T, JIANG M J, THORNTON C. Three-dimensional discrete element analysis of triaxial tests and wetting tests on unsaturated compacted silt [J]. Computers and Geotechnics, 2018, 97: 90-102.
- [22] 张俊峰, 郭莹. 主应力方向和初始成样含水率对饱和重塑粉土单调剪切特性的影响[J]. 岩土力学, 2011, 32(增刊 2): 324-328, 333.
ZHANG J F, GUO Y. Experimental research on effect of orientation of principal stress and initial sampling water content on monotonic shear behavior of saturated remolding silt [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(Sup 2): 324-328, 333. (in Chinese)
- [23] 郭莹, 陈珍. 成样方法对饱和中砂静力三轴固结排水剪切试验结果的影响[J]. 土木工程学报, 2010, 43(增刊 2): 306-311.
GUO Y, CHEN Z. The influence of sample-preparing methods on experiment results of saturated medium sand in static tri-axial consolidation drained shear test [J]. China Civil Engineering Journal, 2010, 43(Sup 2): 306-311. (in Chinese)
- [24] 郭莹, 王跃新. 原状与重塑粉土固结不排水剪切特性的对比试验[J]. 水利学报, 2011, 42(1): 68-75.
GUO Y, WANG Y X. Comparative test study on consolidation un-drained shear characteristics of undisturbed and remolded silt [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2011, 42(1): 68-75. (in Chinese)
- [25] 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]. Géotechnique, 1983, 33(4): 355-383.
- [26] ZDRAVKOVIC L, JARDINE R J. Some anisotropic stiffness characteristics of a silt under general stress conditions [J]. Géotechnique, 1997, 47(3): 407-437.
- [27] 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 of stress-strain properties of intact soft clay considering the change of principal stress direction [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(12): 3720-3726. (in Chinese)
- [28] 刘红, 张吾渝, 冯永珍, 等. 不同平均主应力条件下重塑黄土的应力应变特性[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2021, 43(6): 57-64.
- LIU H, ZHANG W Y, FENG Y Z, et al. Study on stress-strain characteristics of remolded loess under different average principal stress conditions [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2021, 43(6): 57-64.
- [29] GEIGER E, LADE P V. Experimental study of the behavior of cohesionless soil during large stress reversals and reorientation of principal stresses: Report No. UCLA-ENG-7917 [R]. School of Engineering and Applied Science, University of California, Los Angeles, 1979.
- [30] WANG Y K, GAO Y F, GUO L, et al. Influence of intermediate principal stress and principal stress direction on drained behavior of natural soft clay [J]. International Journal of Geomechanics, 2018, 18(1): 04017128.
- [31] 管林波, 周建, 张勋, 等. 中主应力系数和主应力方向对原状黏土各向异性的影响研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(Sup2): 3871-3877.
- GUAN L B, ZHOU J, ZHANG X, et al. Study of influence of parameters of intermediate principal stress and principal stress direction on anisotropy of intact clay [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(Sup2): 3871-3877. (in Chinese)
- [32] 郭林, 王钰轲, 王军, 等. 中主应力与大主应力方向角对软黏土排水变形特性影响[J]. 岩土力学, 2016, 37(5): 1380-1387.
- GUO L, WANG Y K, WANG J, et al. Influence of intermediate principal stress and major principal stress direction on the drainage-induced deformation of soft clay [J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(5): 1380-1387. (in Chinese)
- [33] 熊焕. 考虑应力主轴变化下各向异性砂土静动力特性试验研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2015.
- XIONG H. Experimental study on the static and dynamic behavior of anisotropic sands involving rotation of principal stress axes [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015. (in Chinese)

(编辑 胡英奎)