《路基工程·土的基本性质与本构关系》专栏

【编者按】稳定、坚实、耐久的路基是高质量道路的关键,而土的基本性质与本构关系是其理论基础。随着路基工程的日益复杂化,土所受的外部作用由传统静动力荷载拓展到水-力-热-化等多过程耦合作用,这种变化对本构模拟精度的要求越来越高。因此,土的基本特性与本构关系研究要回归本质,要面向工程需求并围绕地基处理、路基填料工程特性、路基结构性能在多场耦合作用下的演变规律、路堑边坡的稳定性分析、路基防护与支挡等方面深入开展系统性研究,以确保路基工程的稳定性与耐久性。

2024年世界交通运输大会(WTC)于6月26日至29日在青岛召开。在此背景下,本期**《路基工程·土的基本性质与本构关系》**专栏重点报道了关于不同土类型在多场作用下的水-力学特性及微观结构的多个热点、难点研究工作,其中包含"主轴旋转对砂土力学特性的影响""特殊土作为路基材料的改良方法""干湿循环作用下土的微观孔隙演化""黏土的固结特性和渗透特性"等研究,旨在进一步提升对土性的认识,促进本构关系的发展,为复杂环境下的路基工程设计、施工与维护提供科学依据,助力实现交通强国目标。

专栏主编简介:

孔亮,青岛理工大学二级教授(博导、博士)、教育部新世纪优秀人才、山东省自然科学杰出青年基金获得者、礼贤学者特聘教授、国家注册岩土工程师。曾获全国模范教师、全国冶金教育系统年度杰出人物奖、宁夏十大杰出青年、山东省教育系统优秀共产党员、山东省优秀研究生导师、青岛市工人先锋等荣誉称号。兼任世界交通运输大会(WTC)第三届学部委员会公路工程学部公路岩土工程学科土的基本特性与本构关系技术委员会主席、中国力学学会岩土力学专业委员会等5个学会委员、《岩石力学与工程学报》《岩土力学》《地下空间与工程学报》编委。长期从事岩土本构、海洋土力学与能源岩土工程等方面的教学与科研工作,主持国家自然科学基金项目5项、省部级项目9项、横向课题11项,合著专著3部,发表学术论文152篇,授权专利14件,获省级教学与科技奖励3项。

DOI:10.19951/j.cnki.1672-9331.20240314003 **文章编号:**1672-9331(2024)03-0001-10
引用格式:刘超,董彤,孔亮,等.纯应力主轴旋转下固有各向异性砂土力学特性[J].长沙理工大学学报(自然科学版),2024,21(3):1-10,20.
Citation: LIU Chao, DONG Tong, KONG Liang, et al. Experimental study on mechanical properties of inherent anisotropy sand under pure principal stress rotation [J]. J Changsha Univ Sci Tech (Nat Sci), 2024, 21(3): 1-10,20.

纯应力主轴旋转下固有各向异性砂土力学特性

刘超[1,2],董彤[3],孔亮[1,2],王睢[4],张亚君[3]

(1.青岛理工大学 理学院,山东 青岛 266520;2.青岛理工大学 土木工程学院,山东 青岛 266520;
3.军事科学院 国防工程研究院,北京 100850;4.宁波工程学院 建筑与交通工程学院,浙江 宁波 315211)

摘 要:【目的】进一步揭示固有各向异性和偏应力q对砂土力学特性的影响,深化对土应力方向依赖性的认识。**【方法】**利用新型制样装置制备具有固有各向异性的砂土空心圆柱试样,结合空心圆柱扭剪仪,开展一系列不同沉积面倾角α_3和q条件下的不排水纯应力主轴旋转试验。**【结果】**在纯应力主轴旋转条件下,砂土临界周数随着α_3和q的改变而改变,其数值最大可相差9倍;孔压前期累积速率也与α_3和q有关,但中期稳定后的孔压数值受两者的影响较小;随着α_3和q增大,剪应变累积速度加快,滞回圈面积及倾角也会发生变化。**【结论】**砂土的应变发展规律、孔压变化、剪应力-剪应变关系等动力学特性均与固有各向异性和q密切相关,且q的改变也会引起固有各向异性与动力学特性之间关系的变化。

关键词:土力学;砂土;固有各向异性;纯应力主轴旋转;应变分量;孔压;剪应力-剪应变关系
中图分类号:TU435 **文献标志码:**A

收稿日期:2024-03-14;**修回日期:** 2024-04-03;**接受日期:** 2024-04-03
基金项目:国家自然科学基金资助项目(51909268、12172187);博士后创新人才支持计划基金资助项目(BX2021115)
通信作者:董彤(1990—)(ORCID:0000-0002-7624-1965),男,工程师,主要从事岩土力学与地下工程等方面的研究。E-mail:dt0706@126.com;孔亮(1969—)(ORCID:0000-0002-1425-535X),男,教授,主要从事岩土本构模拟、海洋岩土力学与工程等方面的研究工作。E-mail:qdkongliang@163.com

Experimental study on mechanical properties of inherent anisotropy sand under pure principal stress rotation

LIU Chao[1,2], DONG Tong[3], KONG Liang[1,2], WANG Sui[4], ZHANG Yajun[3]

(1.School of Sciences, Qingdao University of Technology, Qingdao 266520, China; 2. School of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266520, China; 3. Institute of Defense Engineering, Academy of Military Sciences, Beijing 100850, China; 4. School of Civil and Transportation Engineering, Ningbo University of Technology, Ningbo 315211, China)

Abstract: [**Purposes**] This paper aims to reveal the effects of inherent anisotropy and deviatoric stress q on the mechanical properties of sand and deepen the understanding of soil dependence on stress direction. [**Methods**] Hollow cylinder specimens of sand with inherent anisotropy were prepared by using a new specimen preparation device. The hollow cylinder apparatus was used, and a series of undrained pure principal stress rotation tests were carried out under conditions of different bedding plane α_3 and q. [**Findings**] During the pure principal stress rotation, the critical rotation cycle of sand varies with the change of α_3 or q, and the maximum numerical difference can be 9 times. The accumulation rate of pore pressure in the early stage is also related with α_3 and q, but the stable pore pressure value in the middle stage is less affected by the two parameters. With the increase in α_3 and q, the accumulation rate of shear strain is accelerated, and the area of hysteresis loops and the dip angle also change. [**Conclusions**] The dynamic properties of sand, such as strain development patterns, pore pressure changes, and shear stress-shear strain relationship, are all closely related with the inherent anisotropy and q, and changes in q affect the relationship between the inherent anisotropy and the dynamic properties.

Key words: soil mechanics; sand; inherent anisotropy; pure principal stress rotation; strain component; pore pressure; shear stress-shear strain relationship

Foundation items: Projects (51909268, 12172187) supported by the National Natural Science Foundation of China; Project (BX2021115) supported by China Postdoctoral Science Foundation

Corresponding author: DONG Tong (1990—) (ORCID: 0000-0002-7624-1965), male, engineer, research interest: rock and soil mechanics and underground engineering. E-mail: dt0706@126.com; KONG Liang (1969—) (ORCID: 0000-0002-1425-535X), male, professor, research interest: geotechnical constitutive modeling and marine geotechnical mechanics and engineering. E-mail: qdkongliang@163.com

0 引言

近年来,为服务“一带一路”“陆海统筹”等国家重大发展战略和政策,我国大规模兴建水电站、铁路机场和港口码头等一系列重大岩土工程。然而,在复杂的地质构造和荷载(波浪、交通和地震等)条件下,土中应力可能发生连续旋转,进而引起堤坝滑移[1]、海床液化[2]等工程事故,严重威胁岩土工程的安全与使用。

国内外学者在应力主轴连续旋转对土力学性质的影响方面开展了大量研究。PAN等[3]利用空心圆柱扭剪仪,初步探讨在波浪荷载和地震荷载作用下的砂土孔压发展规律,其研究结果表明,孔压遵循快速-稳定-突变-剧烈的发展趋势,初始液化次数与试样的相对密实度、初始有效围压和加载频率等因素有关。YANG等[4]分析了相对密实度、偏应力和中间主应力系数等因素对不排水旋转过程中的孔隙压力响应和变形特性的影响。赵凯等[5]通过轴向-扭转耦合循环剪切试验,研究应力路径对砂土剪胀性和变形特性的影响,同时以等效应力循环比描述在不同应力路径下的动应

力。LIANG等[6]、WANG等[7]针对黏土开展一系列主应力轴旋转试验，发现偏应力、中主应力系数与超固结比等因素对黏土孔压、剪应力-剪应变关系及刚度等力学特性具有显著影响。此外，研究还发现在应力主轴连续旋转条件下的土体存在明显的非共轴现象，并且非共轴性与应力路径、偏应力水平、中主应力系数和初始主应力方向等因素密切相关[8-13]。

应力主轴旋转源于土的应力方向依赖性，而后者包括应力方向性和材料方向性（各向异性）。但上述研究主要从应力方向性的角度开展，忽视了在应力主轴旋转条件下的材料各向异性对土力学性质的作用。为此，部分学者通过各向异性固结的方法，研究土在应力历史作用下产生的固有各向异性，例如郭莹等[14]开展在不同初始固结条件下的循环扭剪试验，研究固结条件对砂土动模量和阻尼比的影响；许成顺[15]和熊焕[16]通过各向异性固结的主应力轴连续旋转试验，发现各向异性固结对砂土孔压、应变的积累、体积变形特性及非共轴性均具有显著影响；GEORGIANNOU等[17]和KONSTADINOU等[18]发现各向异性固结显著影响疏松渥太华砂的刚度和阻尼比值，且砂土的孔压和循环阻应力也与固结应力比有关，但相变状态线不受固结条件的影响；GEORGIANNOU等[19]认为相变时的剪切阻力角与应力水平和固结路径无关，仅依赖于中间应力系数和主应力旋转。然而，各向异性固结虽然在一定程度上反映土体的各向异性，但忽略了颗粒因沉积方向不同造成的固有各向异性。PRASANNA等[20]也表明固有各向异性在应力主轴旋转试验研究中极具价值。WANG等[21]通过离散元方法模拟具有固有各向异性的试验，发现固有各向异性对剪切应变的发展有影响。SUN等[22]对比研究干、湿积法对砂土纯应力主轴旋转特性的影响，证明干积法试样的剪切模量和体缩更大，并且非共轴性也更明显。

综上所述，目前鲜见具有固有各向异性的应力主轴连续旋转试验研究，并且材料方向性和应力方向性对土力学性质的耦合作用机理尚不明确。因此，本课题组利用倾斜砂土空心圆柱制备具有固有各向异性的空心圆柱试样[23]，开展在不同偏应力条件下的纯应力主轴旋转试验，并且分析固有各向异性和偏应力对砂土力学特性的影响，以期加深对土体应力方向依赖性的认识。

1　试验设备与原理

1.1　加载设备

图1所示为本研究采用的空心圆柱扭剪试验系统（GDS Instruments，HCA）。图2所示为空心圆柱试样应力状态。

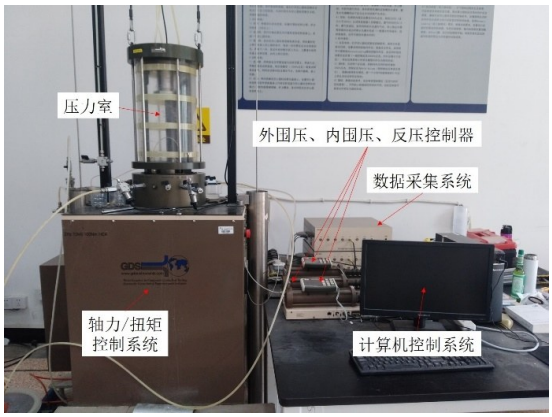


图1　空心圆柱扭剪试验系统

Fig. 1　Test system with hollow cylinder torsional shear

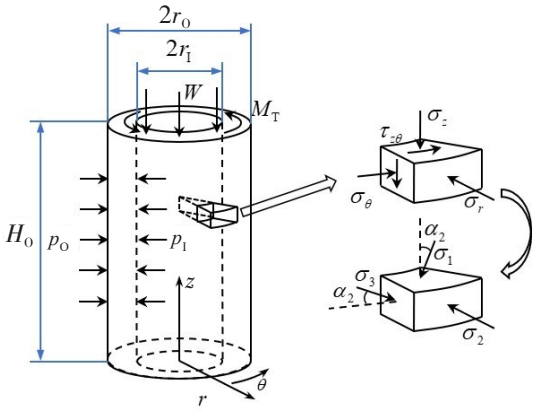


图2　空心圆柱试样应力状态

Fig. 2　Stress state of hollow cylinder specimen

图2中的空心圆柱扭剪仪通过控制外围压p_O、内围压p_I、轴力W和扭矩M_T这4种外荷载，使试样在极坐标系（z-r-θ）中受到轴向应力σ_z、径向应力σ_r、环向应力σ_θ和剪应力$\tau_{z\theta}$的作用，在主应力坐标系中受到大主应力σ_1、中主应力σ_2、小主应力σ_3和主应力方向α_2的作用，在偏应力力系中受到平均应力p、偏应力q、中主应力系数b和α_2的作用。本课题组分析空心圆柱扭剪仪的加载原理，发现复杂应力路径的实现取决于外部荷载，特联合广义应力路径[24]、空心圆柱扭剪仪参数和式(1)~(4)设计了由外部荷载直接确定的空心圆柱扭剪试

验应力路径。

$$p = \frac{W + 3D}{3A} \tag{1}$$

$$q = \left(\frac{W^2 + 3B^2}{A^2} + \frac{27M_T^2}{4C^2}\right)^{\frac{1}{2}} \tag{2}$$

$$b = \left[(W + B)^2 + \frac{9A^2M_T^2}{C^2}\right]^{\frac{1}{2}} \tag{3}$$

$$\alpha_2 = \frac{1}{2}\arctan\frac{3AM_T}{C(W + B)} + (-1)^n\frac{n\pi}{2} \tag{4}$$

式中：$A = \pi(r_0^2 - r_1^2)$；$B = \pi r_0 r_1(p_1 - p_0)$；$C = \pi(r_0^3 - r_1^3)$；$D = \pi(p_0 r_0^2 - p_1 r_1^2)$；$n$为偶数(0,2,4,…,$n$)；$\pi$为圆周率。

1.2 制样设备

具有固有各向异性的砂土试样的制备装置如图3所示。

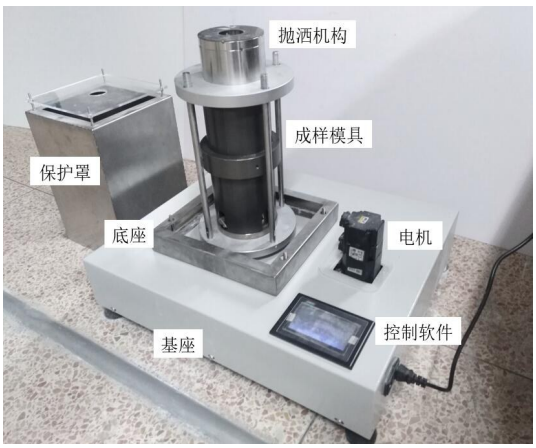


图3 倾斜砂土空心圆柱试样制备装置

Fig. 3 Preparation device for hollow cylinder specimen of sand with dip angle

上述试样制备装置的工作原理如图4所示。首先，制样装置通过电机带动上部结构(包括底座、成样模具和抛洒机构)高速转动，使砂土颗粒在沉积过程中获得离心力F_C(其大小取决于旋转速度)。然后，在重力G和离心力F_C的共同作用下，砂土颗粒沿合力F的方向定向沉积，形成具有沉积面倾角α_3(即沉积面与径向σ_2之间的夹角)的空心圆柱试样。最后，对砂土颗粒进行受力分析可得式(5)~(6)，发现α_3仅与角速度ω有关，进一步取决于仪器转速R。因此，在制样装置的控制软件中输入R值即可精确控制α_3。综上所述，该制样方法由于利用旋转产生的离心力，因此又称转动砂雨法。

$$\tan\alpha_3 = \frac{F_C}{G} = \frac{m\omega^2 r}{mg} = \frac{\omega^2 r}{g} \tag{5}$$

$$R = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{g\tan\alpha_3}{r}} \tag{6}$$

式中：m为试样质量；g为重力加速度常数；r为试样平均半径，r=0.04 m。

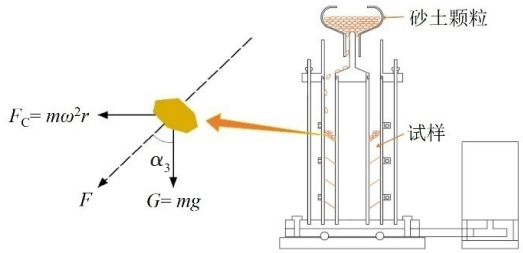
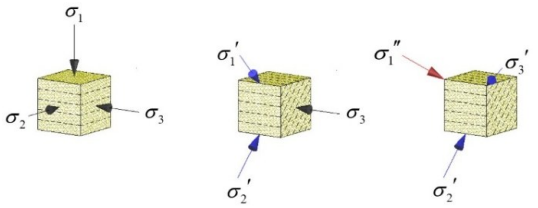


图4 试样制备原理

Fig. 4 Specimen preparation principle

1.3 试验原理

图5(a)为横观各向同性试样的初始应力状态，其中试样沉积面处于水平位置，大主应力σ_1垂直于沉积面。由于在制样过程中，砂土颗粒在沉积排列方向发生变化后，形成倾斜的沉积面，使得试样由横观各向同性变为固有各向异性。此时的主应力σ_1'和σ_2'绕σ_3轴旋转，旋转角度取决于表征固有各向异性程度的α_3，$\alpha_3 \in [0.0°, 90.0°)$，如图5(b)所示。旋转后，$\sigma_1'$依旧垂直于沉积面，但在空间中的方位改变了。此外，空心圆柱扭剪仪还可以实现σ_1'和σ_3绕σ_2'轴连续旋转。由此，本研究通过倾斜砂土空心圆柱试样制备装置和空心圆柱扭剪试验系统，实现对三个主应力大小和两个主应力方向(α_2和α_3)的控制，并以此为基础开展具有固有各向异性的纯主应力轴旋转试验。



(a) 无旋转 (b) 绕σ_3单轴旋转 (c) 绕σ_2'、σ_3'双轴旋转

图5 双应力主轴旋转试验原理图

Fig. 5 Biaxial rotation of principal stress test

2 试验流程

2.1 试样制备

本研究中的试样原材料为福建标准砂，其具

体物性指标见表1。

试样的内径r_1为30 mm，外径r_0为50 mm，高度H_0为200 mm。为研究固有各向异性对砂土力学性质的影响，分别制备了α_3为0.0°、22.5°、45.0°和67.5°的空心圆柱试样。制样时，将砂土按质量分为7等份，然后逐份缓慢倒入成样模具，其中α_3=0.0°的试样采用砂雨法制备，α_3>0.0°的试样采用转动砂雨法制备。制样方法、步骤及科学性检验等其他内容参见本课题组的前期研究[23]。

表1　标准砂的物性指标

Table 1　Physical properties of Fujian standard sand

密度ρ/(g·cm^{-3})	最大孔隙比e_{max}	最小孔隙比e_{min}	相对密实度D_r/%	粒径尺寸d_{50}/mm	不均匀系数C_u
2.643	0.861	0.510	75 ± 3	0.31	1.548

2.2　试样饱和及固结

将试样安装在空心圆柱扭剪仪上进行饱和与固结。饱和分为初始饱和与反压饱和。初始饱和时，将无气水从试样底部通入，再从顶部排出，以置换试样中的空气。为保证空气完全被排出，通入无气水的体积至少为试样体积的3倍。反压饱和时，分阶段增大反压，直至反压达到300 kPa，此外每阶段保持有效围压p'=30 kPa。饱和结束后，保持反压不变，增大p'到80 kPa并进行孔隙水压力系数B值检测，确保所有试样均满足B>0.97的要求。

各向异性固结分三个阶段进行，每个阶段以试样体积在5 min内小于5 mm^{3}为结束标准。在各阶段开始前，先瞬时增大q和p'至设定值，然后保持q和p'不变直到该固结阶段结束，其间主应力方向α_2始终为0°。最终在q为一定值、初始有效围压p'_0=200 kPa条件下开展试验。试验加载应力路径如图6所示。

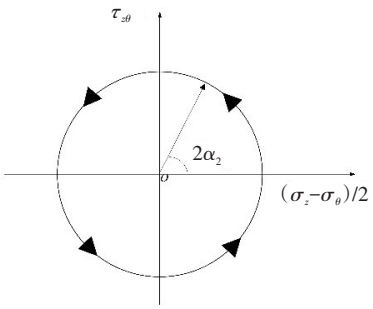


图6　试验应力路径

Fig. 6　Stress path of test

需要指出的是，为达到试验应力路径要求，本研究采用各向异性固结，但该方法难免会对试样的α_3造成一定的扰动，后续将探索更科学更合理的固结方式以减小对试验结果的影响。

2.3　试验方案

为研究在纯应力主轴旋转条件下的固有各向异性砂土的力学特性，对α_3分别为0.0°、22.5°、45.0°和67.5°的重塑砂土空心圆柱试样，在中主应力系数b=0.5、q分别为30、50 kPa的条件下，开展α_2在0°~180°循环旋转的不排水纯应力主轴旋转试验（旋转频率为1 Hz），具体试验方案见表2。

表2　定轴剪切试验方案表

Table 2　Scheme of fixed axis shear test

编号	α_3/(°)	p'_0/kPa	b	q/kPa	α_2/(°)
R00-30	0.0	200	0.5	30	0~180 连续变化
R00-50	0.0			50	
R22.5-30	22.5			30	
R22.5-50	22.5			50	
R45-30	45.0			30	
R45-50	45.0			50	
R67.5-30	67.5			30	
R67.5-50	67.5			50	

为保证试验按照设计的应力路径加载，根据本研究中的空心圆柱扭剪应力路径，并联合式(7)~(10)反推外荷载加载路径。

$$p_0=E\left(p+\frac{2b-1}{3I}q\right)+N\left(p-\frac{2b-1}{6I}q-\frac{q}{I}\cos 2\alpha\right) \quad (7)$$

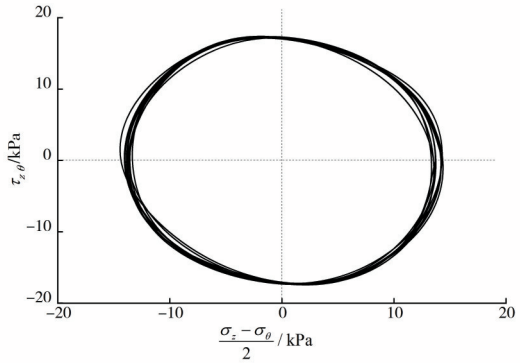
$$p_1=G\left(p+\frac{2b-1}{3I}q\right)-H\left(p-\frac{2b-1}{6I}q-\frac{q}{I}\cos 2\alpha\right) \quad (8)$$

$$W=A\left(p+\frac{1-2b}{6I}q+\frac{q}{I}\cos 2\alpha\right)-D \quad (9)$$

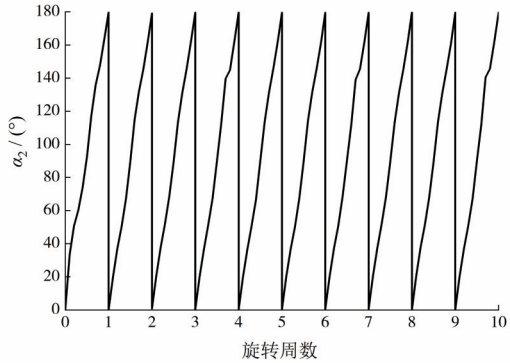
$$M_T=\frac{2C}{3I}q\sin 2\alpha \quad (10)$$

式中：$E=(r_0+r_1)/2r_0$；$N=(r_0-r_1)/2r_0$；$G=(r_0+r_1)/2r_1$；$H=(r_0-r_1)/2r_1$；$I=\sqrt{b^2-b+1}$。

为验证加载方案的合理性，随机选取10周实测α_2和旋转周数的关系曲线、应力路径，如图7所示。从图7看出，应力路径基本为圆形，且在0°~180°连续变化的α_2对应的线段基本光滑，因此设计的应力路径满足纯应力主轴旋转试验要求。



(a) 实测应力路径



(b) 实测主应力方向α_2和旋转周数关系曲线

图7 试验实测数据分析

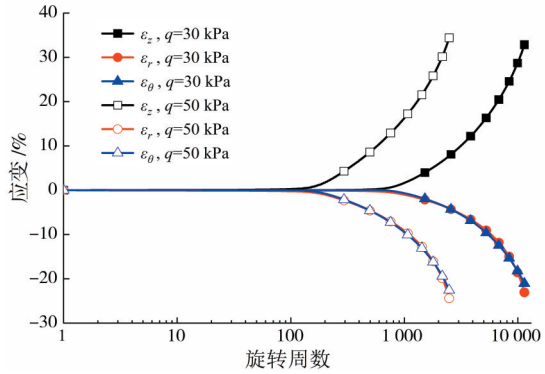
Fig. 7 Analysis of the measured test data

3 结果

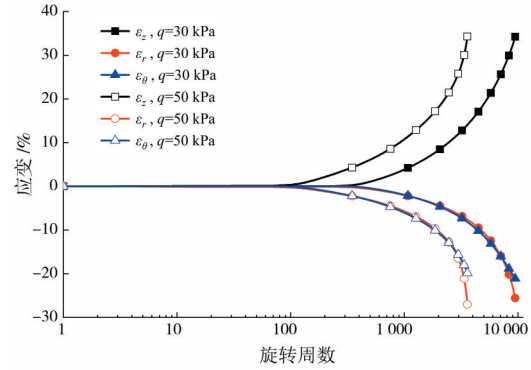
对具有固有各向异性的饱和密砂进行8组纯应力主轴旋转试验,分别从应变分量、孔压和剪应力-剪应变关系等方面,深入分析固有各向异性和纯应力主轴旋转对砂土动力学特性的影响。

3.1 应变分量

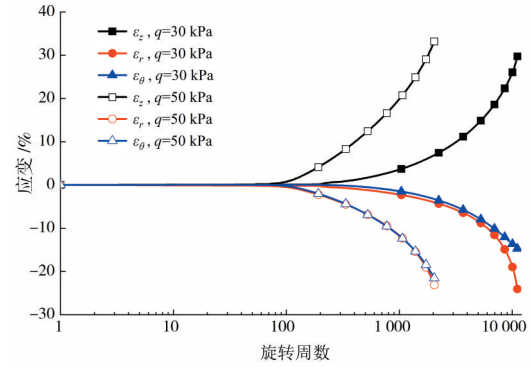
不同α_3和偏应力q对各应变分量发展规律的影响如图8所示。由图8可知,各应变分量的发展趋势基本一致,整体呈反抛物线或抛物线形状。在试验初期,试样处于弹性状态,没有出现明显的应变累积现象。随着旋转周数增加,试样逐渐进入塑性蠕变状态,各应变分量开始累积增加,直至试验结束。此外,在相同α_3和q条件下,轴向应变ε_z、径向应变ε_r和环向应变ε_θ基本同时开始累积,且ε_r和ε_θ的应变增量及累积速度基本相同,而ε_z的约为前两者的和。上述发现表明,在纯应力主轴旋转条件下,试样在轴向压缩的同时伴随着径向和环向的膨胀变形。



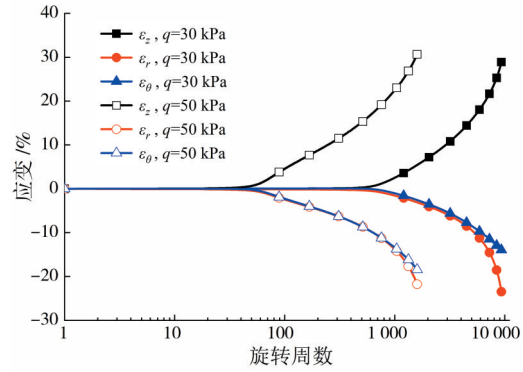
(a) α_3=0.0°



(b) α_3=22.5°



(c) α_3=45.0°



(d) α_3=67.5°

图8 不同偏应力下各应变分量与旋转周数关系曲线

Fig. 8 Relationship between strain components and rotation cycles under different deviatoric stresses

对比图8(a)~8(d)，还发现α_3和q对试样的应变累积起点具有显著影响。因此，本研究将应变累积起点对应的旋转周数定义为临界周数，以表征α_3和q对砂土变形性质的影响。固定q=30、50 kPa，当α_3=0.0°时，砂土的临界周数分别约为600、110周；当α_3=22.5°时，砂土的临界周数分别约为350、100周；当α_3=45.0°时，砂土的临界周数分别约为200、80周；当α_3=67.5°时，砂土的临界周数分别约为500、50周。可见，临界周数受固有各向异性和q的耦合影响。同时，随着固有各向异性增强，q=30 kPa时的砂土临界周数先减小后增大，最大、最小临界周数之间的差距可达2倍；q=50 kPa时的砂土临界周数始终减小，最大、最小临界周数之间的差距可达1倍。但不论固有各向异性如何变化，临界周数总是随q增大而减小，最大差距达到9倍。因此，相对固有各向异性，q对砂土变形特性的影响更大。

3.2　孔压积累

以q=30 kPa、α_3=67.5°时试样的孔压u发展曲线为例，如图9所示，u的发展趋势大体分为三个阶段：第一阶段，随着α_2的连续旋转，u开始快速累积；第二阶段，u累积到一定程度后，其增速逐渐减缓并趋于一定值(即稳定孔压)；第三阶段，当u稳定一段时间后，转而呈现下降的趋势。

图10为在纯应力主轴旋转条件下不同α_3试样的孔压与旋转周数关系曲线。与图8中的应变分量对比可知，在孔压发展的第一阶段，砂土颗粒在循环荷载的作用下出现扰动，使得试样的有效应力降低，进而引起孔压增长，但此阶段试样并未出现明显变形。通过分析相同旋转周数下的孔压发现，在q=30 kPa时，α_3=45.0°的试样孔压累积速度最快，α_3=0°的试样孔压累积速度最慢；在q=50 kPa时，试样孔压累积速度由快到慢依次对应α_3=67.5°、45.0°、22.5°、0.0°。可见，孔压累积规律与应变规律一致，固有各向异性和q的改变均会导致孔压累积速率发生变化。

随着u持续累积，试样逐渐失稳，应变开始发展，而孔压发展规律由循环累积变为围绕稳定孔压波动。但由于本试验采用各向异性固结，所以稳定孔压未能达到初始有效围压，试样中没有出现液化现象。随着α_3从0.0°增大到67.5°，q=30 kPa

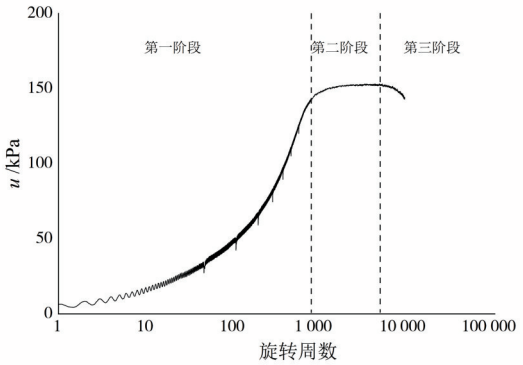
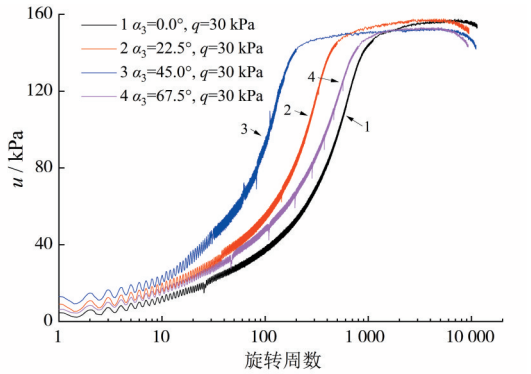
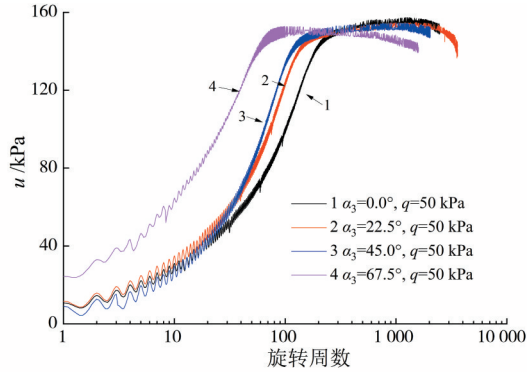


图9　q=30 kPa、α_3=67.5°时试样的孔压发展曲线

Fig. 9　Pore pressure curve of specimen when q=30 kPa and α_3=67.5°



(a) q=30 kPa



(b) q=50 kPa

图10　不同沉积面倾角α_3下孔压与旋转周数关系曲线

Fig. 10　Relationship between pore pressures and rotation cycles under different bedding planes α_3

时的稳定孔压分别约为156、157、152和152 kPa；q=50 kPa时的稳定孔压分别为155、153、152和150 kPa。可见，相较于应力方向角，初始设定的α_3和q对稳定孔压的影响较小。故推测在纯应力主轴旋转路径下，应力诱发各向异性比初始各向异性对稳定孔压值的影响更大。此外，大部分试样的u在第二阶段均呈现波动上升的趋势，但在α_3=67.5°时，其稳定孔压维持时间较短(约200

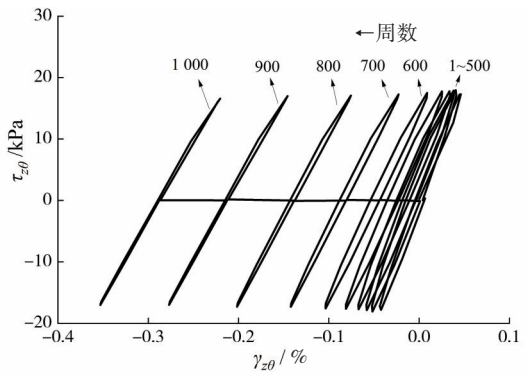
周),之后u持续波动降低。这是因为在较大q和固有各向异性作用下,试样在塑性蠕变期间的稳定性被减弱,其变形发展及破坏程度比其他较小α_3的试样更显著。

在第三阶段,应变累积到一定程度,试样外包裹的橡皮膜制约了试样的剪胀性,增大了砂土颗粒之间的接触,从而导致有效应力增大和孔压小幅度降低。

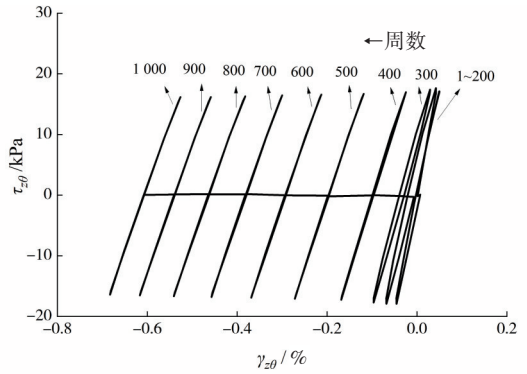
3.3 剪应力-剪应变关系

为了更直观展示在纯应力主轴旋转条件下的剪应力$\tau_{z\theta}$和剪应变$\gamma_{z\theta}$的关系,在q=30 kPa时每隔100周选取1组循环数据,在q=50 kPa时每隔25周选取1组循环数据,相应绘制砂土$\tau_{z\theta}$-$\gamma_{z\theta}$曲线,如图11~12所示。

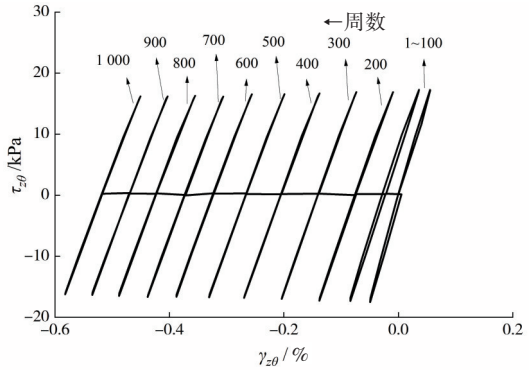
当q=30 kPa时,试样初始的$\tau_{z\theta}$-$\gamma_{z\theta}$曲线为倾斜的椭圆形,表现出明显的滞回现象。随着旋转周数的增加,剪应变逐渐累积,滞回圈面积逐渐减小,$\tau_{z\theta}$-$\gamma_{z\theta}$曲线倾斜程度减小。这表明在连续纯应力主轴旋转作用下,试样的弹性逐渐减小,塑性逐渐增强,循环阻力及动剪切模量均逐渐减小。此外,α_3对试样的$\tau_{z\theta}$-$\gamma_{z\theta}$关系的影响同样显著。随着α_3增大,相同周数下的滞回圈的面积和斜率均先减小后增大,即试样的弹性和动剪切模量均随着固有各向异性的增大先减弱后增大,而塑性先增强后减弱。



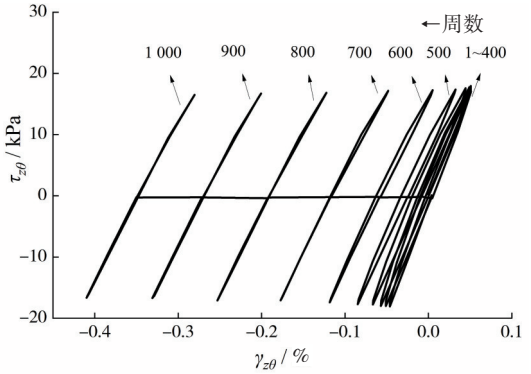
(a) α_3=0.0°



(b) α_3=22.5°



(c) α_3=45.0°

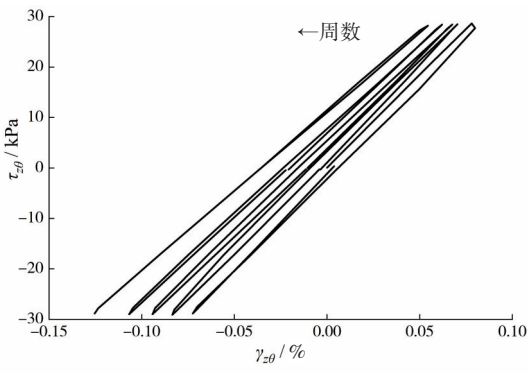


(d) α_3=67.5°

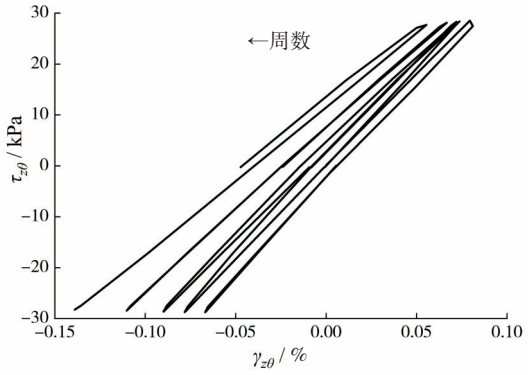
图11 q=30 Pa时不同沉积面倾角α_3下试样剪应力-剪应变关系曲线

Fig. 11 Shear stress-shear strain relationship of specimen under different bedding planes α_3 when q=30 kPa

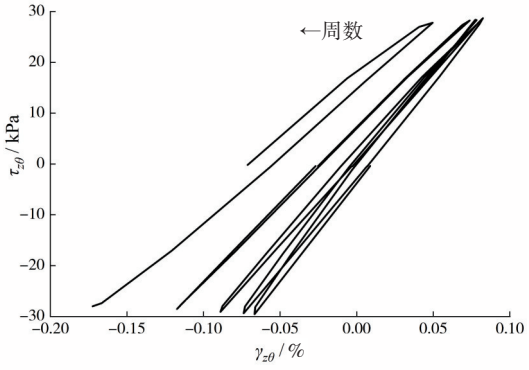
当q=50 kPa时,随着旋转周数增加,$\tau_{z\theta}$-$\gamma_{z\theta}$曲线由密集变为疏松,斜率也逐渐减小,而滞回圈面积在α_3=0.0°时不断减小,在α_3=22.5°、45.0°时先减小后增大,在α_3=67.5°时则始终增大。与图11相比,q的增大进一步减小试样的弹性和动剪切模量,增大试样的塑性及循环阻力,而α_3对试样的弹塑性、动剪切模量和循环阻力的作用与q的作用效果相



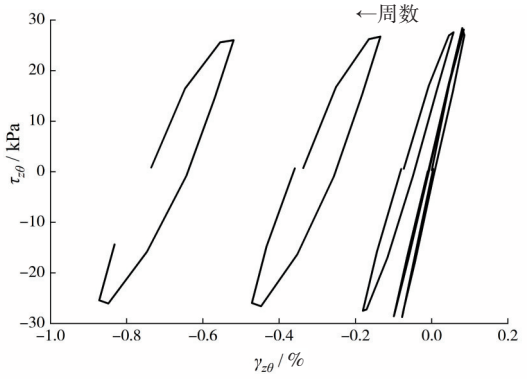
(a) α_3=0.0°



(b) α_3=22.5°



(c) α_3=45.0°



(d) α_3=67.5°

图12　q=50 kPa时不同沉积面倾角α_3下试样剪应力-剪应变关系曲线

Fig. 12　Shear stress-shear strain relationship of specimen under different bedding planes α_3 when q=50 kPa

同。此外，比较不同q下的$\tau_{z\theta}$-$\gamma_{z\theta}$曲线，发现q越大，固有各向异性对砂土动力学特性的影响越强。

综上所述，固有各向异性和q对应变分量、u及$\tau_{z\theta}$-$\gamma_{z\theta}$关系均具有显著影响，其内在机理为颗粒重排。首先，随着固有各向异性的改变，颗粒的初始排列方式发生变化，颗粒间的摩擦、互锁等效应也相应改变，从而影响了砂土的动力学性质，如在q=50 kPa条件下，由于固有各向异性的影响，颗粒间的摩擦和互锁效应减弱，砂土的弹性减弱，孔压累积速度加快，动剪切模量和阻尼比也随之变化。其次，q增大会加剧循环过程中颗粒的运动，从而对颗粒的重新排列产生影响，这同样可以解释固有各向异性的作用效果随q改变而改变的现象。此外，虽然颗粒重排可以解释本研究中的试验现象，但更深层次的数理力学机制还有待研究。

4　结论

本研究利用倾斜砂土空心圆柱试样制备装置和空心圆柱扭剪仪，对饱和密砂开展一系列纯应力主轴旋转试验，分析固有各向异性和偏应力q对砂土动力学特性的作用及其机理。主要结论如下：

1）通过临界周数讨论在纯应力主轴旋转条件下的固有各向异性和q对砂土应变发展规律的影响。固有各向异性和q的增大，均会改变临界周数，从而影响变形特性，其中q对砂土变形特性的影响更大，其引起的临界周数差异最大可达9倍。

2）孔压发展规律分三个阶段，其中第一阶段的固有各向异性和q对孔压增速影响显著，但对稳定孔压的影响较小。

3）在纯应力主轴旋转条件下，砂土剪应力-剪应变曲线具有明显的滞回性，固有各向异性和q均通过影响砂土的弹塑性和动剪切模量来改变剪应力-剪应变关系，而且q可改变固有各向异性对砂土动力学性质的作用效果，其内在机理为颗粒重排。

[参考文献]

[1]　DEL CAMPO J M, NEGRO V. Failures of harbour walls at Malaga and Barcelona [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2011, 70 (1): 1-6. DOI: 10.1007/s10064-010-0313-z.

[2]　王小雯. 波浪作用下饱和砂质海床液化机理研究[D]. 北京：清华大学, 2017.
WANG Xiaowen. Research on mechanics of wave-induced liquefaction in saturated sandy seabed [D]. Beijing: Tsinghua University, 2017.

[3]　PAN H, CHEN G X, SUN T, et al. Characteristics of excess pore water pressure of Nanjing saturated fine sand under the interaction of wave and earthquake loading [J]. Marine Georesources & Geotechnology, 2012, 30(1): 32-51. DOI: 10.1080/1064119x.2011.572579.

[4] YANG Z X, LI X S, YANG J. Undrained anisotropy and rotational shear in granular soil[J]. Géotechnique, 2007,57(4): 371-384. DOI: 10.1680/geot.2007.57.4.371.

[5] 赵凯,吴琪,熊浩,等.双向耦合循环剪切条件下饱和砂土体应变发展规律试验研究[J].岩土工程学报, 2019, 41(7): 1260-1269. DOI: 10.11779/CJGE201907010.
ZHAO Kai, WU Qi, XIONG Hao, et al. Experimental investigations on volumetric strain behavior of saturated sands under bi-directional cyclic loadings[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(7): 1260-1269. DOI: 10.11779/CJGE201907010.

[6] LIANG Z X, LIU Y, LIU Z Y. The undrained behaviour of over-consolidated clay subjected to pure rotation of principal stress directions [J]. Marine Georesources & Geotechnology, 2023, 41(9): 1013-1025. DOI: 10.1080/1064119X.2022.2114393.

[7] WANG S, ZHONG Z L, CHEN B, et al. Experimental study on strain accumulation characteristics of saturated remolded loess under pure rotation of the principal stress axis [J]. Frontiers in Ecology and Evolution, 2023, 11: 1275648. DOI: 10.3389/fevo.2023.1275648.

[8] 蔡燕燕,俞缙,余海岁,等.考虑主应力轴旋转的砂土变形特性试验研究[J].岩石力学与工程学报, 2013, 32(2): 417-424. DOI: 10.3969/j. issn. 1000-6915.2013.02.025.
CAI Yanyan, YU Jin, YU Haisui, et al. Experimental study of deformation behaviour of sand under rotation of principal stress axes [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(2): 417-424. DOI: 10.3969/j.issn.1000-6915.2013.02.025.

[9] QIAN J G, DU Z B, YIN Z Y. Cyclic degradation and non-coaxiality of soft clay subjected to pure rotation of principal stress directions [J]. Acta Geotechnica, 2018, 13(4): 943-959. DOI: 10.1007/s11440-017-0567-8.

[10] 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. DOI: 10.1007/s11440-018-0735-5.

[11] 扈萍,滕越,马少坤,等.主应力旋转条件下粉细砂的非比例加载变形特性[J].山东大学学报(工学版), 2022, 52(6): 89-95. DOI: 10.6040/j. issn. 1672-3961.0.2021.354.
HU Ping, TENG Yue, MA Shaokun, et al. Non-proportional loading deformation characteristics of silty fine sand under principal stress rotation[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2022, 52(6): 89-95. DOI: 10.6040/j.issn.1672-3961.0.2021.354.

[12] SHEN Y, DU W H, XU J H, et al. Non-coaxiality of soft clay generated by principal stress rotation under high-speed train loading[J]. Acta Geotechnica, 2022, 17(2): 411-426. DOI: 10.1007/s11440-021-01242-5.

[13] ZHUANG Heng, WANG Jun, GAO Ziyang. Anisotropic and noncoaxial behavior of soft marine clay under stress path considering the variation of principal stress direction [J]. International Journal of Geomechanics, 2022, 22(6): 04022062. DOI: 10.1061/(asce)gm.1943-5622.0002390.

[14] 郭莹,栾茂田,史旦达,等.初始应力条件对松砂动力变形特性影响的试验研究[J].岩土力学, 2005, 26(8): 1195-1200. DOI: 10.16285/j.rsm.2005.08.004.
GUO Ying, LUAN Maotian, SHI Danda, et al. Experimental study on effect of initial stress condition on dynamic behavior and deformation parameters of loose sands[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(8): 1195-1200. DOI: 10.16285/j.rsm.2005.08.004.

[15] 许成顺.复杂应力条件下饱和砂土剪切特性及本构模型的试验研究[D].大连:大连理工大学, 2006.
XU Chengshun. Experimental study on shear behavior and constitutive model of saturated sands under complex shear loading [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2006.

[16] 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 Huan. Experimental study on the static and dynamic behavior of anisotropic sands involving rotation of principal stress axes [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015.

[17] GEORGIANNOU V N, KONSTADINOU M. Effects of density on cyclic behaviour of anisotropically consolidated Ottawa sand under undrained torsional loading[J]. Géotechnique, 2014, 64(4): 287-302. DOI: 10.1680/geot.13.p.090.

[18] KONSTADINOU M, GEORGIANNOU V N. Cyclic behaviour of loose anisotropically consolidated Ottawa sand under undrained torsional loading [J]. Géotechnique, 2013, 63(13): 1144-1158. DOI: 10.1680/geot.12.p.145.

[19] GEORGIANNOU V N, KONSTADINOU M, TRIANTAFYLLOS P. Sand behavior under stress states involving principal stress rotation [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2018, 144(6): 04018028. DOI: 10.1061/(asce)gt.1943-5606.0001878.

[20] PRASANNA R, SIVATHAYALAN S. Liquefaction of sands subjected to principal stress rotation caused by generalized seismic loading[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2022, 59(8): 1427-1442. DOI: 10.1139/cgj-2021-0035.

(下转第20页)

[13] SHI B, MURAKAMI Y, WU Z S. Orientation of aggregates of fine-grained soil: quantification and application[J]. Engineering Geology, 1998, 50(1/2): 59-70. DOI: 10.1016/s0013-7952(97)00082-3.

[14] WANG H L, ZHOU W H, YIN Z Y, et al. Effect of grain size distribution of sandy soil on shearing behaviors at soil-structure interface [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2019, 31 (10): 04019238. DOI: 10.1061/(ASCE) MT. 1943-5533. 0002880.

[15] EINAV I. Breakage mechanics, part I: Theory [J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2007, 55(6): 1274-1297. DOI: 10.1016/j.jmps.2006.11.003.

[16] SINGH S, MURTHY T G. Evolution of structure of cohesive granular ensembles in compression [J]. International Journal of Solids and Structures, 2022, 238: 111359. DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2021.111359.

[17] WANG W Y, WEI D H, GAN Y X. An experimental investigation on cemented sand particles using different loading paths: failure modes and fabric quantifications [J]. Construction and Building Materials, 2020, 258: 119487. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119487.

[18] LI X S, WANG Y. Linear representation of steady-state line for sand [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1998, 124 (12): 1215-1217. DOI: 10.1061/(ASCE) 1090-0241 (1998) 124:12(1215).

[19] 孙逸飞, 高玉峰, 鞠雯. 分数阶塑性力学及其砂土本构模型[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(8): 1535-1541. DOI: 10.11779/CJGE201808021.
SUN Yifei, GAO Yufeng, JU Wen. Fractional plasticity and its application in constitutive model for sands [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40 (8): 1535-1541. DOI: 10.11779/CJGE201808021.

[20] SUN Y F, XIAO Y. Fractional order plasticity model for granular soils subjected to monotonic triaxial compression [J]. International Journal of Solids and Structures, 2017, 118-119: 224-234. DOI: 10.1016/j. ijsolstr.2017.03.005.

[21] CAPUTO M. Linear models of dissipation whose Q is almost frequency independent: II [J]. Geophysical Journal International, 1967, 13(5): 529-539. DOI: 10.1111/j.1365-246x.1967.tb02303.x.

[22] 费康, 刘汉龙, 孔纲强, 等. 热力耦合边界面模型在COMSOL中的开发应用[J]. 岩土力学, 2017, 38 (6): 1819-1826. DOI: 10.16285/j.rsm.2017.06.033.
FEI Kang, LIU Hanlong, KONG Gangqiang, et al. Implementation of a thermo-bounding surface model in COMSOL [J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38 (6): 1819-1826. DOI: 10.16285/j.rsm.2017.06.033.

[23] EVGIN E, FAKHARIAN K. Effect of stress paths on the behaviour of sand steel interfaces [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1996, 33(6): 853-865. DOI: 10.1139/t96-116-336.

[24] FAKHARIAN K, EVGIN E. Cyclic simple-shear behavior of sand-steel interfaces under constant normal stiffness condition [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1997, 123 (12): 1096-1105. DOI: 10.1061/(ASCE) 1090-0241 (1997) 123:12(1096).

(责任编辑:刘平;校对:彭三军)

(上接第10页)

[21] WANG Rui, FU Pengcheng, ZHANG Jianmin, et al. Deformation of granular material under continuous rotation of stress principal axes[J]. International Journal of Geomechanics, 2019, 19 (4): 04019017. DOI: 10.1061/(asce)gm.1943-5622.0001383.

[22] SUN Q, DONG Q Y, CAI Y Q, et al. Drained deformation characteristics of granular soil under pure principal stress axis rotation: impact of sample preparation [J]. Acta Geotechnica, 2021, 16 (6): 1755-1772. DOI: 10.1007/s11440-020-01103-7.

[23] 董彤, 刘超, 房雨雨, 等. 倾斜沉积砂土空心圆柱试样制备方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41 (增刊2): 3551-3558. DOI: 10.13722/j. cnki. jrme.2022.0102.
DONG Tong, LIU Chao, FANG Yuyu, et al. Study on preparation method of hollow cylindrical sample of inclined sedimentary sand[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022, 41(sup 2): 3551-3558. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2022.0102.

[24] 董彤, 郑颖人, 孔亮, 等. 空心圆柱扭剪试验中广义应力路径的控制与实现[J]. 岩土工程学报, 2017, 39 (增刊1): 106-110. DOI: 10.11779/CJGE2017S1021.
DONG Tong, ZHENG Yingren, KONG Liang, et al. Control and realization of generalized stress paths in HCA test [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39 (sup 1): 106-110. DOI: 10. 11779/CJGE2017S1021.

(责任编辑:彭三军;校对:刘平 赵冰)