

DOI: 10.11779/CJGE2020S1005

主应力轴变化下各向异性钙质砂的定轴剪切特性

沈 扬¹, 梁 晖¹, 葛华阳¹, 俞演名², 沈 雪¹

(1. 河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210024; 2. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 浙江 杭州 310000)

摘要: 为探究各向异性南海钙质砂的剪切特性, 利用GDS空心圆柱扭剪仪, 通过不同大主应力方向上的定轴剪切试验, 对比分析了钙质砂和石英砂的原生各向异性, 揭示了原生各向异性对强度和孔压的影响。结果表明: 钙质砂和石英砂在强度上均表现出各向异性, 随着大主应力方向角 α (大主应力方向与竖直方向夹角) 的增大, 强度先降低后增加, 在 $\alpha=70^\circ$ 时最低; 钙质砂原生各向异性更为显著, 不同大主应力方向上钙质砂的强度变化幅度约为石英砂的1.4~1.5倍; 钙质砂和石英砂破坏时的孔压值都随着 α 的增大而增大, 破坏时的状态也都由趋于剪胀逐渐向趋于剪缩变化; 与石英砂不同的是, 钙质砂破坏时亨开尔孔压系数的最大值出现在 $\alpha=70^\circ$, 而非 $\alpha=90^\circ$; 钙质砂各应变分量开展程度在不同大主应力方向上表现出差异性, 破坏时的径向应变随大主应力方向角变化幅度最小, 破坏时的扭剪应变随大主应力方向角变化幅度最大。

关键词: 钙质砂; 主应力轴变化; 各向异性; 定轴剪切特性

中图分类号: TU435 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2020)S1-0022-05

作者简介: 沈 扬(1980—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事土体静动力学特性和本构方面理论的研究工作。
E-mail: shenyang1998@163.com。

Fixed-axis shear characteristics of anisotropic calcareous sand under variation of principal stress axes

SHEN Yang¹, LIANG Hui¹, GE Hua-yang¹, YU Yan-ming², SHEN Xue¹

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210024, China;

2. Huadong Engineering Corporation Limited, Power China, Hangzhou 310000, China)

Abstract: In order to explore the shear characteristics of anisotropic calcareous sand, the GDS hollow cylinder torsional shear apparatus is used to compare and analyze the anisotropy of calcareous sand and quartz sand through the fixed-axis shear tests in different directions of large principal stress to reveal the effects of inherent anisotropy on strength and pore pressure. The results show that both the calcareous sand and the quartz sand exhibit anisotropy in strength. As the large principal stress direction angle α (the angle between the large principal stress direction and the vertical direction) increases, the strength decreases first and then increases, and reach the minimum when $\alpha = 70^\circ$. The anisotropy of calcareous sand is more pronounced, and the magnitude of change in strength of calcareous sand in different directions of large principal stress is about 1.4 to 1.5 times that of quartz sand. The pore pressure values of the calcareous sand and quartz sand both increase with the increase of α , and the state of failure also gradually changes from tending to dilatancy to shrinking. Different from that of the quartz sand, the maximum value of Henkel's pore pressure coefficient appears at $\alpha = 70^\circ$ instead of $\alpha = 90^\circ$. The radial strain ε_r at the time of failure has the smallest amplitude change with the direction angle of the large principal stress, and the torsional shear strain γ_{20} has the largest one.

Key words: calcareous sand; variation of principal stress axes; anisotropy; fixed-axis shear characteristic

0 引言

砂土在沉积过程中由于颗粒优选排列方向不同, 颗粒接触空间差异, 孔隙形状或大小变化等原因, 形成了空间上的定向排列, 构成了细观结构的原生各向异性^[1]。砂土的原生各向异性对其剪切性质影响显著。Oda^[2]通过微观量测发现, 土体沉积时颗粒长轴定向排

列形成的这种沉积结构在后期加载过程中变化甚微。很多学者在土强度与原生各向异性关系方面展开了研究, 大部分研究工作采用真三轴试验、中空扭剪试验和平面应变试验。Yamada 等^[3]通过试验研究表明, 在

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51979087)

收稿日期: 2020-06-03

其他条件相同时, 大主应力面与沉积面重合时抗剪强度最高。于艺林等^[4]通过定轴排水剪切试验, 发现存在一个大主应力方向使云母砂的强度达到最小, 而扈萍等^[5]对山东汶河粉细砂展开的定轴排水剪切试验也得出了相似的结果。此外, 不少学者的研究表明大主应力方向对砂土的孔压特性和应变发展也有影响^[6-7]。

在砂土各向异性研究中采用的试验材料主要有日本的丰浦砂 (Oda、Tatsuoka 等)、英国的 Leighton Buzzard 砂 (Arthur、Yasin 等), 以及加拿大的 Santa Monica 砂 (Lade 等)。钙质砂是中国南海岛礁最主要的吹填地基材料, 同时在南北纬 30° 之间的热带或亚热带气候的大陆架和海岸线附近也广泛分布, 对钙质砂力学行为的研究具有很高的实际价值。吴京平等^[8]较早将钙质砂的基本特性作为专门的课题进行研究, 总结出钙质砂具有颗粒形状极不规则、高内摩擦角、高孔隙比 (含内孔隙)、颗粒易破碎等特点, 这与普通陆源砂相比存在很大差异, 从而在力学行为上表现出特性。随后, 学者们通过大量试验表明, 在相同孔隙比和相近的颗粒分布条件下, 钙质砂的内摩擦角明显大于普通石英砂, 且存在一个不可忽略的“表观黏聚力”^[9]。此外, 钙质砂颗粒的长短轴之比要比石英砂高得多^[10], 加剧了钙质砂的原生各向异性。

前人对于钙质砂原生各向异性与力学行为关系的研究鲜有涉及, 因此有必要对各向异性钙质砂开展不同大主应力方向上的定轴剪切试验, 探究强度、孔压和变形随大主应力方向的变化规律, 总结主应力轴变化下各向异性钙质砂的剪切特性。

1 试验材料及方案

1.1 试验材料

试验所用钙质砂取自中国南沙群岛某岛礁吹填地基, 为未胶结的松散体, 多为珊瑚碎屑和海洋生物的骨架、残骸等。图 1 为试验所用钙质砂颗粒的电镜扫描图片。由图可见, 钙质砂的颗粒形状较石英砂更具有不规则性, 棱角丰富, 以块状、片状为主。



图 1 典型钙质砂颗粒的电镜扫描图片 (30 倍)

Fig. 1 Scanning electron micrograph of typical calcareous sand particles (30 times)

图 2 为钙质砂的级配曲线。配制与钙质砂相同级配的石英砂作对比试验, 其主要物理指标如表 1 所示。

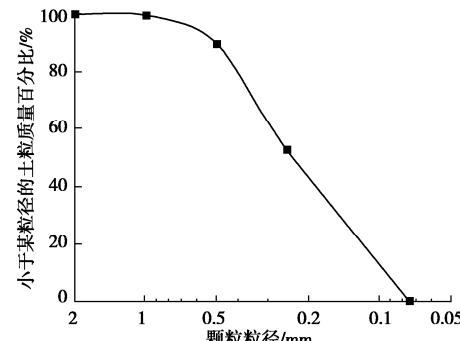


图 2 钙质砂的级配曲线

Fig. 2 Gradation curve of calcareous sand

表 1 试验材料主要物理指标

Table 1 Basic property parameters of test sands

砂样	C_u	C_c	e_{max}	e_{min}	G_s
钙质砂	3.0	0.59	1.058	0.731	2.69
石英砂	3.0	0.59	0.878	0.510	2.65

1.2 试验方案与试样参数

通过河海大学 GDS 空心圆柱扭剪仪 (HCA) 对钙质砂和石英砂分别进行不同大主应力方向角的定轴固结不排水剪切试验, 大主应力方向角分别为 0°, 20°, 45°, 70° 和 90°, 固结方式为等向固结, 固结压力为 100 kPa。

空心圆柱试样的应力应变参数定义如下:

平均主应力 p (kPa),

$$p = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \quad ; \quad (1)$$

偏应力 q (kPa),

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

偏应变 ε_q ,

$$\varepsilon_q = \varepsilon_1 - \varepsilon_3 = \sqrt{(\varepsilon_z - \varepsilon_{\theta})^2 + (\gamma_{z\theta})^2} \quad ; \quad (3)$$

偏应力比 η ,

$$\eta = \frac{q}{p} \quad ; \quad (4)$$

广义剪应变 ε_s ,

$$\varepsilon_s = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2} \quad ; \quad (5)$$

中主应力系数 b ,

$$b = \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3} \quad . \quad (6)$$

式中 σ_1 , σ_2 , σ_3 分别为大主应力、中主应力、小主应力; σ_z , σ_r , σ_{θ} , $\tau_{z\theta}$ 分别为轴向正应力、径向正应力、切向正应力、扭剪应力; ε_1 , ε_2 , ε_3 分别为大主应变、中主应变、小主应变; ε_z , ε_r , ε_{θ} , $\gamma_{z\theta}$ 分别为轴向应变、径向应变、切向应变和扭剪应变。

定轴剪切时偏应力 q 线性增大, 增大速率为 10 kPa/min, 平均主应力 p 保持为 100 kPa, 中主应力系数 b 保持为 0.5。

2 试验结果分析

2.1 强度变化规律

图 3 为钙质砂和石英砂在不同大主应力方向上的偏应力 - 广义剪应变的关系曲线。从图中可以看出, 大主应力方向角 α 对于钙质砂和石英砂的偏应力 - 广义剪应变关系有着显著影响。在相同的广义剪应变下, 随着 α 的增大, 试样所承受的偏应力 q 越来越小, 当 $\alpha=70^\circ$ 时最小, 随后略有增加。同时可以发现, 不论是钙质砂还是石英砂, 当 $\alpha=45^\circ$, 70° , 90° , 其强度较为接近, 且当偏应力增大到一定程度后, 广义剪应变会迅速增大, 在广义剪应变达到 3% 后发生拐点, 因此, 对于 $\alpha=45^\circ$, 70° , 90° 的试样, 以广义剪应变 ε_s 达到 5% 作为破坏标准会偏危险, 故将破坏标准降为广义剪应变 ε_s 达到 3%。

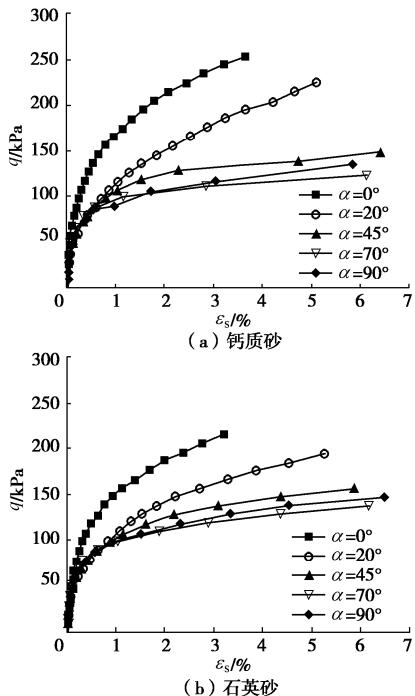


图 3 钙质砂和石英砂不同大主应力方向上的偏应力 q - 广义剪应变 ε_s 关系曲线

Fig. 3 Bias stress q and generalized shear strain ε_s curve in different directions of large principal stress

以试样破坏时(广义剪应变 3%)的偏应力比(q/p)_f (即 η_f) 和有效偏应力比(q/p')_f (即 η'_f) 来反映不同大主应力方向上的钙质砂和石英砂的强度, 如图 4 所示。从图中可以看出, 钙质砂和石英砂在强度上均表现出原生各向异性, 随着大主应力方向角的增大, 强度逐渐降低, 在 $\alpha=70^\circ$ 时最低, 随后略有增加。同时可以发现, 钙质砂偏应力比和有效偏应力比随大主

应力方向角变化的幅度高于石英砂, 约为石英砂的 1.4~1.5 倍 (以有效偏应力比最大最小值之差为表征)。

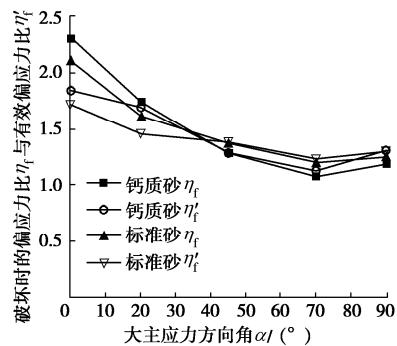


图 4 不同大主应力方向上钙质砂和石英砂的破坏时的偏应力比 η_f 和有效偏应力比 η'_f

Fig. 4 Bias stress ratio η_f and effective bias stress ratio η'_f in different directions of large principal stress

砂土强度的原生各向异性可以从微观角度进行解释。Yang 等^[11]利用微观影像分析技术和数理统计方法对日本丰浦砂的各向异性结构进行了定量描述, 得出丰浦砂颗粒长轴优选方向相对于竖直方向的角度大致为 $70^\circ \sim 80^\circ$ 。一方面, 在制样方法上, 笔者对钙质砂和石英砂进行的定轴剪切试验均以干法制样为基础, 采用落砂法分层填筑试样, 与 Yang 等的制样方法一致; 另一方面, 丰浦砂的长径比 (1.16~2.27)^[12] 与钙质砂 (1.88~2.10) 和石英砂 (1.40~1.74)^[10] 相近。由此可以推测笔者进行的定轴剪切试验中钙质砂和石英砂长轴优选方向与 Yang 等的试验结论相近, 相对于竖直方向的角度也大致为 $70^\circ \sim 80^\circ$ 。在砂的长轴优选方向上砂颗粒之间的咬合作用最弱, 当大主应力方向平行于这个方向时, 砂颗粒间最容易发生滑移、错动, 在宏观上表现为强度最低, 这很好地解释了当 $\alpha=70^\circ$ 时钙质砂和石英砂的强度最低。相对而言, 钙质砂在强度上的各向异性比石英砂要大, 因此, 虽然当 α 较小时, 钙质砂的强度比石英砂高, 但当 $\alpha \geq 45^\circ$ 后, 石英砂的强度接近甚至反超了钙质砂。

2.2 孔压发展规律

图 5 为不同大主应力方向上钙质砂和石英砂的孔压 - 广义剪应变关系曲线。由于钙质砂和石英砂的孔压峰值都不高, 其规律性不是很明显。相对而言, 试样破坏时的孔压规律则较为明显。不论是钙质砂还是石英砂, 试样破坏时的孔压值都随着 α 的增大而增长, 但增长的趋势愈发平缓。当 $\alpha=0^\circ$ 和 20° 时, 钙质砂和石英砂的破坏孔压均为明显的负值, 当 $\alpha \geq 45^\circ$ 时, 破坏孔压变成了正值。这说明随着大主应力方向角 α 的增大, 钙质砂和石英砂破坏时的状态由趋于剪胀逐渐过渡为趋于剪缩。这是由于砂土试样在制

样过程中, 是由击实器从竖直方向对试样进行击实, 因此试样在竖直方向上的密实程度最高, 水平方向上相对而言较低, 再加上随着 α 增大砂颗粒间更容易发生滑移、错动, 因此试样趋于剪缩的趋势越来越明显。石英砂在孔压上的各向异性也比钙质砂要小。

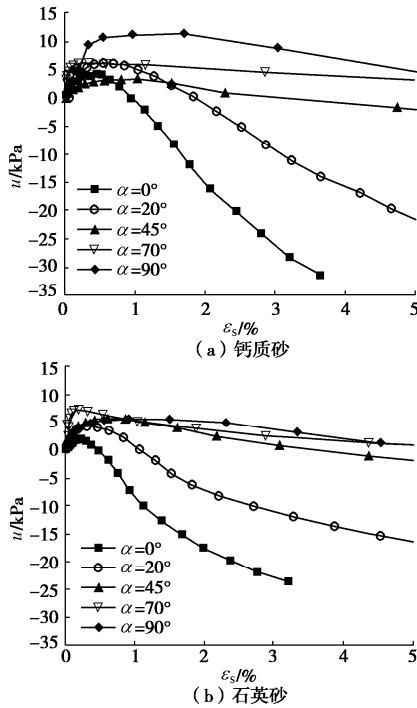


图 5 钙质砂和石英砂不同大主应力方向上的孔压 u - 广义剪应变 ε_s 关系曲线

Fig. 5 Relationship between pore pressure u and generalized shear strain ε_s in different directions of large principal stress

基于前人的研究, 采用主应力全量型表述的亨开尔孔压公式, 对复杂应力状态变化下的孔压发展进行分析, 具体如下:

$$u = \beta \left(\frac{\Delta \sigma_1 + \Delta \sigma_2 + \Delta \sigma_3}{3} \right) + A_h \sqrt{(\Delta \sigma_1 - \Delta \sigma_2)^2 + (\Delta \sigma_2 - \Delta \sigma_3)^2 + (\Delta \sigma_1 - \Delta \sigma_3)^2} \quad (7)$$

式中 u 为孔压值 (kPa); $\Delta \sigma_1$, $\Delta \sigma_2$, $\Delta \sigma_3$ 分别为定轴剪切过程中大、中、小主应力的变化值 (kPa), A_h 为定轴剪切过程中的亨开尔孔压系数; β 反映土体的饱和程度, 对于饱和土, $\beta=1$ 。

对于平均主应力 p 和中主应力系数 b 保持定值的定轴剪切试验, 式 (7) 可简化为

$$u = A_h \sqrt{2b^2 - 2b + 2} \cdot q \quad (8)$$

以 A_{hf} 表示试样破坏时的亨开尔孔压系数, 图 6 为钙质砂和石英砂的破坏亨开尔孔压系数 A_{hf} 与大主应力方向角 α 的关系曲线。从图 6 中可以发现, 石英砂的 A_{hf} 随 α 的增大而增大, 而钙质砂则是在 $\alpha=70^\circ$ 时达到最大, 随后略有下降。 α 相同时, 两种砂的 A_{hf} 相差不大。

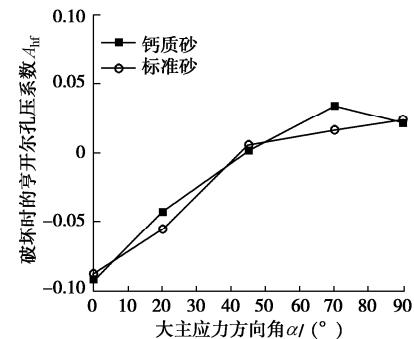


图 6 破坏时钙质砂和石英砂的亨开尔孔压系数与大主应力方向角的关系曲线

Fig. 6 Relationship between Henkel's pore pressure coefficient and direction angle of large principal stress during failure

2.3 各应变分量发展规律

图 7 为不同大主应力方向上钙质砂的各应变分量与偏应力比的关系曲线, 各应变分量包括轴向应变 ε_z 、切向应变 ε_θ 、径向应变 ε_r 和扭剪应变 $\gamma_{z\theta}$ 。从图中可以看出, 各应变分量在剪切初期增长比较缓慢, 开展程度低, 在不同大主应力方向上开展的差异性几乎可忽略不计。随着剪切的进行, 各应变分量开展程度提高, 且在不同大主应力方向上表现出应变开展程度的差异性。轴向应变 ε_z 和切向应变 ε_θ 发展规律具有对称性。

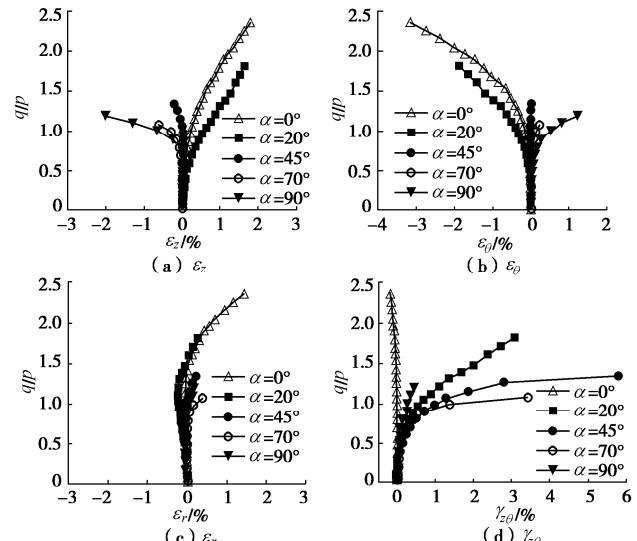


图 7 不同大主应力方向上钙质砂的各应变分量与偏应力比关系曲线

Fig. 7 Curves of the relationship between strain components and deviatoric stress of calcareous sand in different directions of large principal stress

图 8 为破坏时 (广义剪应变 3%) 各应变分量值与大主应力方向角关系曲线。由图可见, 钙质砂破坏时各应变分量值随着大主应力方向角的改变呈现出不同的变化规律。其中, 破坏时的径向应变 ε_r 随大主应力方向角变化幅度最小, 在 0~2% 范围内波动; 破坏时的扭剪应变 $\gamma_{z\theta}$ 随大主应力方向角变化幅度最大, 当

$\alpha=0^\circ, 90^\circ$ 时, $\gamma_{z\theta}$ 近似为 0 (最小值), 当 $\alpha=45^\circ$ 时, $\gamma_{z\theta}$ 接近 6% (最大值)。此外, 破坏时轴向应变 ε_z 值和切向应变 ε_θ 值与大主应力方向角关系曲线存在对称性。

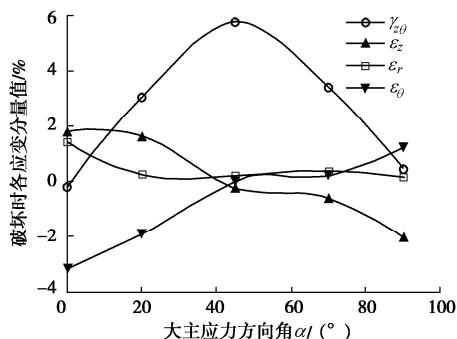


图 8 破坏时钙质砂各应变分量值与大主应力方向角关系曲线

Fig. 8 Curves of relationship between strain component value of calcareous sand and direction angle of large principal stress during failure

3 结 论

(1) 钙质砂和石英砂静力特性均表现出明显的原生各向异性。两种砂土的强度均随着大主应力方向角 α 的增大而减小, 在 $\alpha=70^\circ$ 时最低, 随后略有增加。钙质砂原生各向异性更为显著, 不同大主应力方向上钙质砂的强度变化幅度 (以偏应力比和有效偏应力比最大最小值之差为表征) 约为石英砂的 1.4~1.5 倍。

(2) 钙质砂和石英砂破坏时孔压值都随着 α 的增大而增大, 破坏时的状态也都由趋于剪胀逐渐向趋于剪缩变化。与常规石英砂的 A_{hf} 随 α 的增大而增大不同, 钙质砂是在 $\alpha=70^\circ$ 时达到最大, 随后略有下降。

(3) 钙质砂各应变分量在不同大主应力方向上定向剪切时表现出应变开展程度的差异性, 破坏时各应变分量值随着大主应力方向角的改变呈现出不同的变化规律。破坏时的径向应变 ε_r 随大主应力方向角变化幅度最小; 破坏时的扭剪应变 $\gamma_{z\theta}$ 随大主应力方向角变化幅度最大。此外, 轴向应变 ε_z 和切向应变 ε_θ 发展规律具有对称性。

参 考 文 献:

- [1] ARTHUR J R F, MENZIES B K. Inherent anisotropy in a sand[J]. Géotechnique, 1972, 22(1): 115~128.
- [2] ODA M. Experimental study of anisotropic shear strength of sand by plane strain tests[J]. Soils and Foundations, 1978, 18(1): 25~38.

- [3] YAMADA Y, ISHIHARA K. Anisotropic deformation characteristics of sand under three-dimensional stress conditions[J]. Soils and Foundations, 1979, 19(2): 79~94.
- [4] 于艺林, 张建民, 童朝霞, 等. 定轴排水剪切试验中各向异性砂土的力学响应[J]. 岩土力学, 2011, 32(6): 1637~1642. (YU Yi-lin, ZHANG Jian-min, TONG Zhao-xia, et al. Behavior of anisotropic mica sand under fixed principal stress axes drained shear test[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(6): 1637~1642. (in Chinese))
- [5] 厉萍, 魏超, 杨令强, 等. 定轴剪切实验中砂土的非共轴变形特性[J]. 济南大学学报(自然科学版), 2017, 31(6): 478~484. (LI Ping, WEI Chao, YANG Ling-qiang, et al. Non-coaxial behavior of sands in fixed principal stress axes shear tests[J]. Journal of University of Jinan (Science and Technology), 2017, 31(6): 478~484. (in Chinese))
- [6] SYMES M J, GENS A, HIGHT D W. Undrained anisotropy and principal stress rotation in saturated sand[J]. Géotechnique, 1984, 34(1): 11~27.
- [7] NATAKA Y, HYODO M, et al. Flow deformation of sands subjected to principal stress rotation[J]. Soils and Foundations, 1998, 38(2): 115~128.
- [8] 吴京平, 楼志刚. 海洋桩基工程中的钙质土[J]. 中国海洋平台, 1994(增刊 1): 462~465. (WU Jing-ping, LOU Zhi-gang. Calcareous soil in marine pile foundation engineering[J]. The Ocean Engineering, 1994(Z1): 462~465. (in Chinese))
- [9] WANG X Z, WANG X, JIN Z C, et al. Shear characteristics of calcareous gravelly soil[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2017, 76(2): 561~573.
- [10] 沈扬, 沈雪, 俞演名, 等. 粒组含量对钙质砂压缩变形特性影响的宏细观研究[J]. 岩土力学, 2019, 40(10): 3733~3740. (SHEN Yang, SHEN Xue, YU Yan-ming, et al. Macro-micro study on compressive deformation properties of calcareous sand with different gradations[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(10): 3733~3740. (in Chinese))
- [11] YANG Z X, LI X S, YANG J. Quantifying and modelling fabric anisotropy of granular soils[J]. Géotechnique, 2008, 58(4): 237~248.
- [12] 庄丽, 宫全美. 减围压平面应变压缩试验条件下丰浦砂中剪切带特性研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(增刊 1): 201~208. (ZHUANG Li, GONG Quan-mei. Shear band characteristics of Toyoura sand in plane strain compression with decreasing confining pressure[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(S1): 201~208. (in Chinese))

(编校: 孙振远)