

## 应力路径对粉土变形特性影响的试验研究

钱军杰,曹宇春,杨建辉,霍超

(浙江科技学院 土木与建筑工程学院,杭州 310023)

**摘要:** 为了研究不同应力路径下的粉土变形特性,采用粉土试样进行了一系列不同应力路径的室内三轴固结排水试验,研究  $K_0$  固结状态下不同应力路径对粉土变形及塑性流动方向的影响规律。结果表明:在  $p-q$  应力空间中,沿  $0^\circ$  和  $45^\circ$  方向角的应力路径下,体应变为剪胀;沿大于  $45^\circ$  方向角的应力路径下,体应变先剪胀后剪缩,且体应变程度随着固结围压的升高而减小;随着应力路径方向角的增大,塑性应变曲线顺时针旋转;在塑性剪应变-塑性体应变空间中,塑性应力增量曲线随应力路径增量角的增大而逆时针旋转,同时塑性流动角增大。试验结果可为类似粉土地基工程提供参考。

**关键词:** 粉土;应力路径;塑性流动方向;剪胀;应力方向角

**中图分类号:** TU441.6      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1671-8798(2020)06-0557-06

## Experimental study on influence of stress paths on deformation behavior of silt

QIAN Junjie, CAO Yuchun, YANG Jianhui, HUO Chao

(School of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University of  
Science and Technology, Hangzhou 310023, Zhejiang, China)

**Abstract:** In order to study the deformation behavior of silt under different stress paths, a series of triaxial consolidated-drained tests were carried out on silt samples under different stress paths in laboratory, probing into the influence of different stress paths on the deformation and plastic flow direction of silt under  $K_0$  consolidation state. The results show that in  $p-q$  stress space, the volume strain features dilatancy under the stress paths of stress direction angle from  $0^\circ$  to  $45^\circ$ . In the stress paths whose direction angles are greater than  $45^\circ$ , the volume strain exhibits dilatancy followed by contraction, and the volume strain magnitude decreases with the increase of consolidation confining

**收稿日期:** 2020-06-09

**基金项目:** 国家自然科学基金青年科学基金项目(40406019);浙江省公益技术应用研究计划项目(2014C33037);浙江省自然科学基金项目(LY14E080012)

**通信作者:** 曹宇春(1972—),男,山西省大同人,副教授,博士,主要从事土体的力学特性与地基处理研究。E-mail: shtjcyc@163.com。

pressure; the plastic strain curve rotates clockwise as the stress direction angle increases; in the plastic shear strain-plastic volume strain space, the plastic stress increment curve rotates counterclockwise as the increment angle of stress path increases while the plastic flow angle increases. The results can provide reference value for similar silt foundation engineering.

**Keywords:** silt; stress path; plastic flow direction; dilatancy; stress direction angle

随着城市化进程的加快,城市用地减少,地下空间得到了大力开发。在基坑和隧道开挖等施工过程中土体发生复杂的应力变化,导致应力路径发生不同方向的改变,而粉土广泛存在于沿海城市的地层中,且频繁出现在工程实践中,因此对不同应力路径下粉土的变形特性进行深入研究十分必要。国内外在应力路径<sup>[1-2]</sup>方面已做了大量的研究。刘国斌等<sup>[3]</sup>对软土的卸荷模量与应力路径的关系进行了研究,得到了卸荷模量与应力路径的关系式。高彬等<sup>[4-5]</sup>对饱和黏土在不同应力路径下的力学特性进行了研究,发现不同应力路径下的孔隙水压力曲线和应力应变曲线有明显不同。朱楠等<sup>[6]</sup>对结构性软黏土不同应力路径下的微观结构进行了研究,发现孔隙直径和颗粒的定向排列受应力路径影响较大。王钰轲等<sup>[7]</sup>通过英国全球数字系统(global digital systems,GDS)空心圆柱扭剪仪进行不同循环应力比下的主应力轴连续旋转试验,得到了循环应力比对轴向和剪切应力应变滞回曲线的影响规律。关于塑性流动方面,沈珠江等<sup>[8-9]</sup>发现应力路径方向和塑性应变方向具有相关性,提出了部分屈服面的概念。施维成等<sup>[10]</sup>以粗粒土为对象进行了真三轴试验,发现传统本构模型存在着塑性势面两侧不连续的问题,提出了考虑塑性流动连续性的本构模型。陈晨等<sup>[11-12]</sup>分别提出了一个描述砂土的修正剪胀方程和描述膨胀土的非线性四元蠕变模型。汪俊敏等<sup>[13]</sup>将 Zhang 等<sup>[14]</sup>提出的饱和土弹塑性本构模型推广到不饱和土中,并通过不饱和土不排水循环加载试验进行验证。上述研究都取得了较好的成果,但仍存在一定的局限性,如未能考虑传统本构模型中塑性剪应力的微分存在等于零的情况而导致的不连续问题,不能很好地描述土体的塑性流动规律,而部分研究虽然提出了考虑连续性的本构模型,但是缺乏试验验证。综上所述,目前对不同应力路径下粉土的变形及塑性流动规律研究尚不够深入。于是,本研究通过一系列不同应力路径下粉土的三轴固结排水试验,利用塑性流动角  $\gamma$  来描述塑性流动规律,探讨应力路径对粉土变形及塑性流动规律的影响。

## 1 试验设备和材料

### 1.1 试验设备

试验采用英国 GDS 伺服电机控制的动三轴测试系统(图 1),由压力控制系统、数据测量系统和数据采集系统三部分组成。轴压控制器通过控制底座的升降完成轴向压力的加卸载;围压控制器通过吸水或排水调节压力室内围压的大小;反压控制器连接至试样帽,通过吸水或排水调节试样反压值,并测量试样内孔隙水压力及体积。

### 1.2 试验材料

#### 1.2.1 试样制备

本研究采用重塑粉土。根据 GB/T 50123—2019《土工试验方法标准》<sup>[15]</sup>制备试样,试样高度为

80 mm,直径为 39.1 mm。采用真空饱和与反压饱和相结合的方法进行饱和,将装入饱和器的试样放入真空饱和缸中,抽气 2 h 使压力表读数达到 -0.1 MPa 大气压后,装入无气水没过试样顶部,持续抽气 12 h。安装试样后进行反压饱和,保持围压控制器和反压控制器的读数差值为 20 kPa,加载至要求围压,当孔压与反压的比值  $B$  达到 0.95 以上,视为饱和完成。

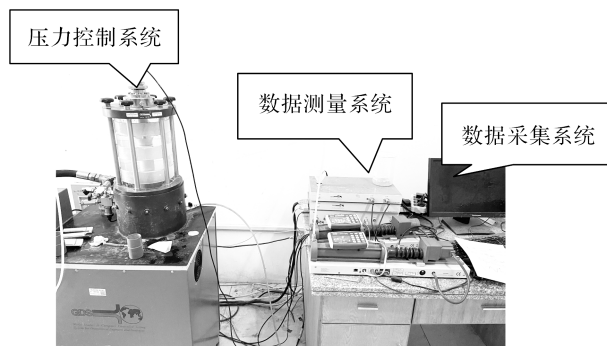


图 1 GDS 伺服电机控制的动三轴测试系统

Fig. 1 Dynamic triaxial test system controlled by GDS servo motor

1.2.2 材料参数

根据 GB/T 50123—2019《土工试验方法标准》<sup>[15]</sup> 进行相对密度试验和液塑限试验,得到粉土颗粒相对密度  $G_s$  为 2.70,液限  $\omega_L$  和塑限  $\omega_P$  分别为 26% 和 19%。此外还进行常规三轴排水剪切、等压固结与回弹试验和三轴卸载试验,得到内聚力  $c$  为 0 kPa,内摩擦角  $\varphi$  为  $36^\circ$ ,各向等压固结试验参数  $\lambda$  为 0.009,回弹参数  $\kappa$  为 0.002 8,泊松比  $\nu$  为 0.3。压缩回弹试验曲线如图 2 所示。常规三轴排水剪切和等压固结与回弹试验所用粉土试样孔隙比  $e$  控制在 0.65。

2 试验方案

通过 GDS 动三轴测试系统的  $K_0$  固结模块实现  $K_0$  固结,通过反压控制器测量试样水体积的排出量,据此换算调整底座的高度,轴向压力由数据测量系统计算跟踪施加。在  $p$ - $q$  ( $p$  指平均主应力, $q$  指广义剪应力)空间中设计应力方向角  $\chi$  为  $0^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $72^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $108^\circ$ 、 $120^\circ$  和  $180^\circ$  的几种应力路径,探究不同应力路径对粉土变形特性的影响,如图 3 所示。具体试验方案见表 1, $\sigma_3$  为不同径向固结围压, $e_0$  为初始孔隙比。控制方式设置为应力控制,加卸载速率  $\Delta q$  设置为 1 kPa/min,变形特性主要由轴向应变表征。

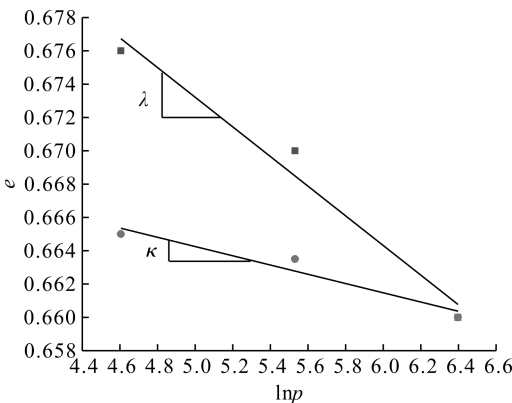


图 2 压缩回弹试验曲线  
Fig. 2 Compression-rebound test curve

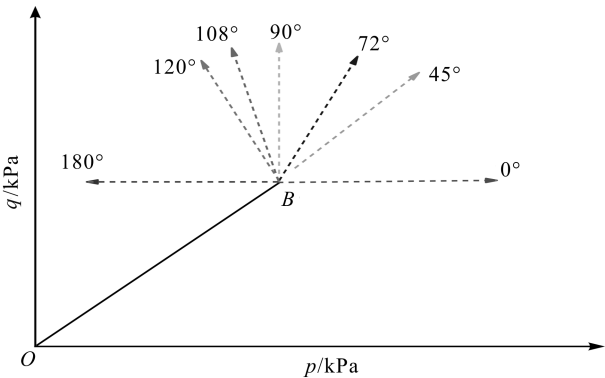


图 3 应力路径试验示意图  
Fig. 3 Schematic diagram of stress path test

表 1 试验方案  
Table 1 Test scheme

编号	$\chi/(^\circ)$	$\sigma_3/\text{kPa}$	$K_0$	初始孔隙比 $e_0$
1	0	100	0.4	0.638
2	0	200	0.4	0.664
3	0	300	0.4	0.712
4	45	100	0.4	0.742
5	45	200	0.4	0.635
6	45	300	0.4	0.613
7	72	100	0.4	0.623
8	72	200	0.4	0.715
9	72	300	0.4	0.612
10	90	100	0.4	0.633
11	90	200	0.4	0.633
12	90	300	0.4	0.677
13	108	100	0.4	0.682
14	108	200	0.4	0.732
15	108	300	0.4	0.643
16	120	100	0.4	0.623
17	120	200	0.4	0.632
18	120	300	0.4	0.731
19	180	100	0.4	0.657
20	180	200	0.4	0.711
21	180	300	0.4	0.631

### 3 试验结果

#### 3.1 不同应力路径对径向应变的影响

图 4 为不同应力方向角下应力比与径向应变  $\varepsilon_r$  的关系曲线。由图 4 可知,各曲线起点的径向应变趋于 0,说明采用  $K_0$  固结模块进行  $K_0$  固结后,径向应变  $\varepsilon_r$  几乎不发生变化,可较好地模拟土体的天然固结状态。应力方向角  $\chi$  为  $0^\circ$  的应力路径下,随着应力比的减小,试样逐渐伸长;应力方向角  $\chi$  为  $45^\circ$  的应力路径下,应力比保持为 1,试样逐渐伸长,程度随固结围压的增大而减小;应力方向角  $\chi$  为  $72^\circ$  和  $90^\circ$  的应力路径下,固结围压为 100 kPa 时试样伸长,固结围压为 200 kPa 和 300 kPa 时试样先伸长后压缩;应力方向角  $\chi$  为  $108^\circ$ 、 $120^\circ$  和  $180^\circ$  的应力路径下,随着应力比的增大,试样压缩,压缩速率随着应力方向角的增大而增大。试样发生压缩破坏时,峰值应力比都趋于 1.5,这说明以峰值应力比为粉土的强度指标时,应力路径变化对粉土的强度影响不大。

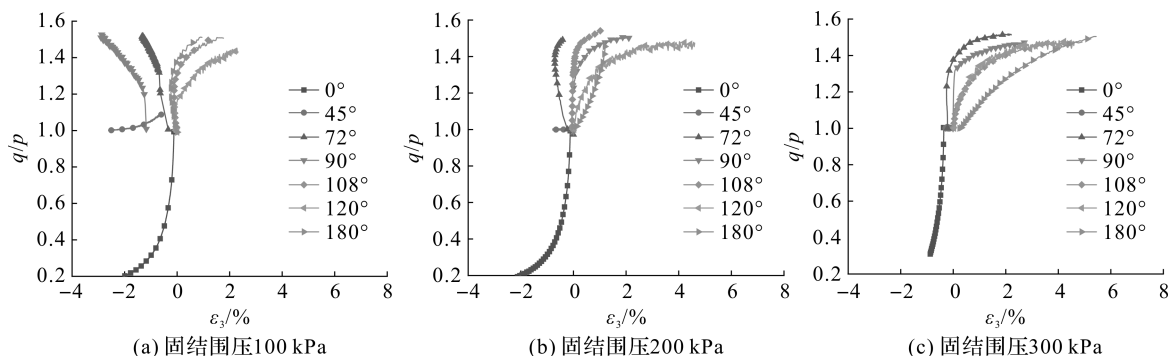


图 4 应力比与径向应变关系曲线

Fig. 4 Relationship curve of stress ratio and radial strain

#### 3.2 不同应力路径对体应变的影响

图 5 为不同应力方向角下应力比与体应变  $\varepsilon_v$  的关系曲线。由图 5 可知,应力方向角  $\chi$  为  $0^\circ$  和  $45^\circ$  的应力路径下,试样剪胀,剪胀程度与固结围压大小呈负相关;应力方向角  $\chi$  为  $72^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $108^\circ$ 、 $120^\circ$ 、 $180^\circ$  的应力路径下,试样先剪胀后剪缩。在 300 kPa 固结围压时,试样几乎不发生剪胀,试样剪缩。应力方向角  $\chi$  为  $120^\circ$  的应力路径下,体应变在达到相同应力比时最大,这是由于在相同的加载速率下,该应力路径达到破坏线的时间最短、剪缩程度最大。

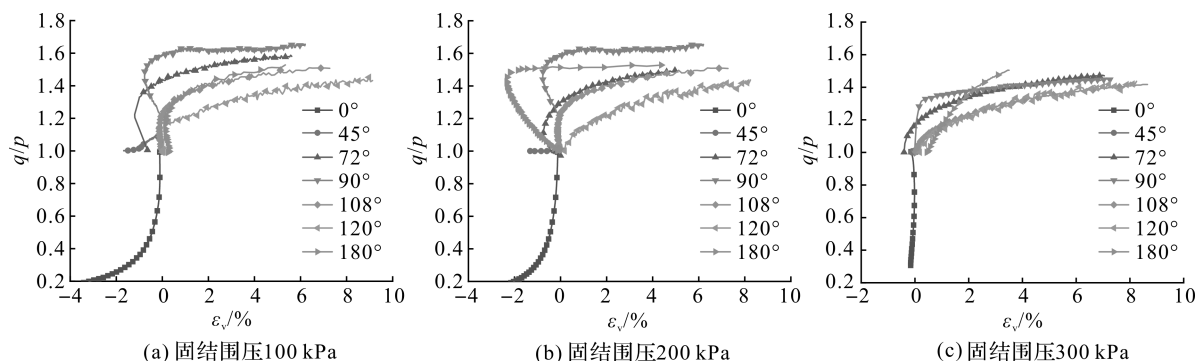


图 5 应力比-体应变关系曲线

Fig. 5 Relationship curve of stress ratio and volume strain

#### 3.3 不同应力路径对塑性应变的影响

塑性应变  $\varepsilon_{ij}^p$  由总应变  $\varepsilon_{ij}$  减去弹性应变  $\varepsilon_{ij}^e$  而得,其计算公式<sup>[16]</sup>如下:

$$d\varepsilon_d^e = \frac{2}{9} \times \frac{1+v}{1-2v} \times \frac{\kappa}{1+e_0} \times \frac{1}{p} dq; \quad (1)$$

$$d\varepsilon_v^e = \frac{\kappa}{1+e_0} \times \frac{1}{p} dp; \quad (2)$$

$$\epsilon_{ij}^p = \epsilon_{ij} - \epsilon_{ij}^e \quad (3)$$

式(1)~(2)中: $\epsilon_a^e$  为弹性剪应变; $\epsilon_v^e$  为弹性体应变。

图6为不同应力方向角下固结围压为100 kPa时的塑性应变曲线。由图6(a)~(b)可知,随应力方向角增大,塑性剪应变 $\epsilon_a^p$ 和塑性体应变 $\epsilon_v^p$ 曲线顺时针旋转,塑性剪应变曲线呈应变软化特性。由图6(c)可知,塑性应变曲线呈线性增长,随应力方向角的增大而逆时针旋转,塑性流动角 $\gamma$ 为塑性应变曲线与 $\epsilon_v^p$ 正半轴的夹角,随应力方向角的增大而增大。

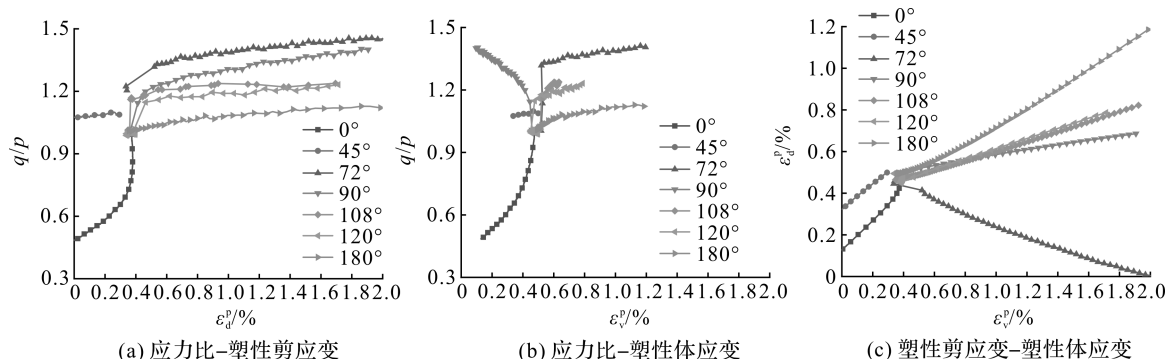


图6 固结围压为100 kPa时的塑性应变曲线

Fig. 6 Plastic strain curve under consolidation confining pressure of 100 kPa

图7、图8为不同应力方向角下固结围压为200、300 kPa时的塑性剪应变-塑性体应变曲线。不同应力路径下塑性流动角 $\gamma$ 见表2。

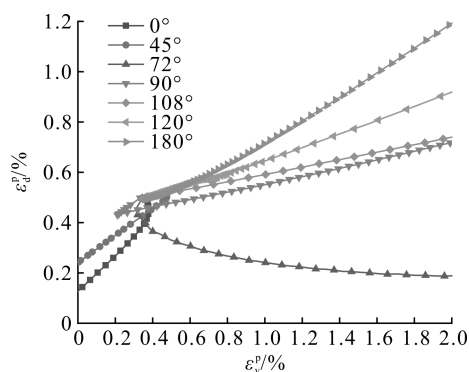


图7 固结围压为200 kPa时的塑性剪应变-塑性体应变关系曲线

Fig. 7 Plastic shear strain and plastic volume strain curve under consolidation confining pressure of 200 kPa

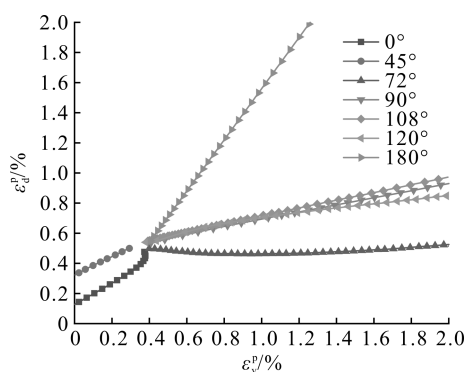


图8 固结围压为300 kPa时的塑性剪应变-塑性体应变关系曲线

Fig. 8 Plastic shear strain and plastic volume strain curve under consolidation confining pressure of 300 kPa

表2 不同应力路径下的塑性流动角 $\gamma$

Table 2 Plastic flow angle  $\gamma$  under different stress paths

$\chi/(^\circ)$	$\gamma/(^\circ)$		
	100 kPa	200 kPa	300 kPa
0	-134.6	-138.4	-140.5
45	-153.8	-155.6	-168.6
72	-27.6	-32.8	-13.6
90	12.8	7.8	6.9
108	13.5	8.6	7.3
120	24.6	10.3	8.1
180	32.0	27.1	47.1

使用多项式拟合塑性流动角 $\gamma$ 和应力方向角 $\chi$ 的关系,相关系数为0.990 8。拟合曲线如图9所示,多项式如下:

$$\gamma = -137 - 18.5\chi + 0.836\chi^2 - 9.69 \times 10^{-3}\chi^3 + 5.43 \times 10^{-5}\chi^4 - 1.10 \times 10^{-7}\chi^5。$$

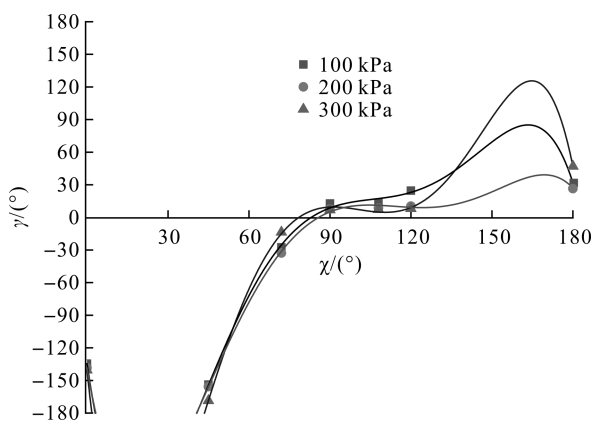


图 9 塑性流动角和应力方向角多项式拟合曲线

Fig. 9 Polynomial fitting curve of plastic flow angle and stress direction angle

#### 4 结 论

本文从粉土三轴固结排水试验入手,探讨了不同应力路径下粉土的变形和塑性流动规律,主要结果如下:1)应力方向角 $\chi$ 为 $0^\circ$ 和 $45^\circ$ 的应力路径下,试样剪胀,剪胀程度与固结围压大小呈负相关;应力方向角 $\chi$ 为 $72^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $108^\circ$ 、 $120^\circ$ 、 $180^\circ$ 的应力路径下,试样先剪胀后剪缩。固结围压为 300 kPa 时,试样几乎不发生剪胀。应力方向角 $\chi$ 为 $120^\circ$ 的应力路径下,体应变在达到相同应力比时最大。2)随应力方向角增大,塑性剪应变 $\epsilon_s^p$ 曲线顺时针旋转,塑性体应变 $\epsilon_v^p$ 曲线顺时针旋转; $\epsilon_s^p$ - $\epsilon_v^p$ 坐标轴中塑性应变曲线随应力方向角的增大而逆时针旋转。3)拟合得到了饱和粉土塑性流动角 $\gamma$ 和应力方向角 $\chi$ 关系的多项式。

#### 参考文献:

- [1] LAMBE T W. Stress path method[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 1967, 93(6): 309.
- [2] LADE P V, DUNCAN J M. Stress-path dependent behavior of cohesionless soil[J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, 1976, 102(1): 51.
- [3] 刘国彬,侯学渊. 软土的卸荷模量[J]. 岩土工程学报, 1996, 18(6): 18.
- [4] 高彬. 贵阳红黏土在不同应力路径下的力学特性试验研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2019.
- [5] 李校兵,郭林,蔡袁强,等.  $K_0$  固结饱和软黏土的三轴应力路径试验研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2015, 46(5): 1820.
- [6] 朱楠,刘春原,赵献辉,等. 不同应力路径下  $K_0$  固结结构性黏土微观结构特征试验研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(6): 1899.
- [7] 王钰轲,王永帅,方宏远,等. 圆形应力路径下软黏土的动力特性试验研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(5): 1643.
- [8] 沈珠江. 土的弹塑性应力应变关系的合理形式[J]. 岩土工程学报, 1980, 2(2): 11.
- [9] BALASUBRAMANIAN A S, CHAUDRY A R. Deformation and strength characteristics of soft Bangkok clay[J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, 1978, 104(9): 1153.
- [10] 施维成,代国忠,李雄威,等. 土的弹塑性模型缺陷分析及改进探讨[J]. 水电能源科学, 2017, 35(11): 103.
- [11] 陈晨,孙逸飞,宋顺翔. 砂土三轴压缩和拉伸行为的分数阶塑性模型[J]. 防灾减灾工程学报, 2020, 40(3): 380.
- [12] 李晶晶,孔令伟. 膨胀土卸荷蠕变特性及其非线性蠕变模型[J]. 岩土力学, 2019, 40(9): 3465.
- [13] 汪俊敏,熊勇林,杨骥莱,等. 不饱和土动弹塑性本构模型研究[J]. 岩土力学, 2019, 40(6): 2323.
- [14] ZHANG F, YE B, NODA T, et al. Explanation of cyclic mobility of soils: approach by stress-induced anisotropy[J]. Soils and Foundations, 2007, 47(4): 635.
- [15] 中华人民共和国住房和城乡建设部,国家市场监督管理总局. 土工试验方法标准: GB/T 50123—2019[S]. 北京: 中国计划出版社, 2019.
- [16] 李广信. 高等土力学[M]. 2 版. 北京: 清华大学出版社, 2016.