

泥炭质土 K_0 固结不同开挖路径应力-应变关系研究

阮永芬, 潘继强, 胡经魁, 闫明, 郭宇航

An experimental study of the stress-strain relationship of different excavation paths for soft soil K_0 consolidation

RUAN Yongfen, PAN Jiqiang, HU Jingkui, YAN Ming, and GUO Yuhang

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202206007>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

初始固结应力对平面应变黄土剪切破坏特性影响

Effect of initial solidification stress on shear failure characteristics of loess under the plane strain condition

李宝平, 杨倩, 张玉, 平高权, 王智 水文地质工程地质. 2020, 47(5): 92-99

基于高分子复合材料改良砂土三轴剪切试验研究

Triaxial shear test of sand improved by polymer composite

王龙威, 刘瑾, 奚灵智, 武立林, 郑川, 祁长青 水文地质工程地质. 2020, 47(4): 149-157

高含水量冻粉黏土应力-应变曲线特性的试验研究

An experimental study of the stress-strain characteristics of frozen silty clay with high moisture content

张遂, 匡航, 靳占英, 徐国方 水文地质工程地质. 2020, 47(5): 116-124

一种基于弹性能释放率的岩石新型统计损伤本构模型

A statistical damage constitutive rock model based on elastic energy release rate

刘文博, 孙博一, 陈雷, 张树光 水文地质工程地质. 2021, 48(1): 88-95

不同应力路径下饱和重塑黄土的力学特性

Mechanical properties of saturated remolded loess under different stress paths

赵丹旗, 付昱凯, 侯晓坤, 李同录, 李萍, 李燕, 张林 水文地质工程地质. 2022, 49(6): 74-80

考虑基质吸力的非饱和土邓肯-张统计损伤修正模型

The Duncan-Chang statistical damage correction model of unsaturated soil considering matric suction

谭维佳, 魏云杰, 王俊豪, 高敬轩 水文地质工程地质. 2022, 49(1): 84-91



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202206007

阮永芬, 潘继强, 胡经魁, 等. 泥炭质土 K_0 固结不同开挖路径应力-应变关系研究 [J]. 水文地质工程地质, 2023, 50(2): 112-121.
RUAN Yongfen, PAN Jiqiang, HU Jingkui, *et al.* An experimental study of the stress-strain relationship of different excavation paths for soft soil K_0 consolidation[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2023, 50(2): 112-121.

泥炭质土 K_0 固结不同开挖路径应力-应变关系研究

阮永芬¹, 潘继强¹, 胡经魁², 闫明³, 郭宇航³

(1. 昆明理工大学建筑工程学院, 云南昆明 650500; 2. 中国有色金属工业昆明勘察设计院有限公司, 云南昆明 650051; 3. 中铁二十局集团第五工程有限公司, 云南昆明 650000)

摘要: 基坑开挖过程中不同部位的土体会因不同的卸荷力学行为而表现出动态的破坏特性。为研究基坑土体开挖过程中复杂的卸荷应力路径, 利用 TSZ-1S 应力控制式三轴仪分别对湖相沉积的泥炭质土进行固结不排水及 K_0 固结下的加、卸荷试验, 并按侧向、轴向、轴侧向同时卸荷等不同卸荷条件制定试验方案, 模拟基坑开挖过程中不同部位土体卸荷路径下的应力-应变曲线、卸荷剪切破坏时的强度及初始切线模量等的变化规律。试验结果表明: 土体的应力-应变特性与应力路径密切相关, 各路径下应力-应变曲线都近似呈双曲线型; 卸荷剪切破坏时强度明显低于加荷破坏。对不同卸荷路径下初始切线模量(E_t)的研究发现, E_t 受侧向卸荷影响较大, 卸荷后 E_t 有所提高, 轴向卸荷对其影响较小。对各应力-应变曲线进行归一化处理, 构建了考虑不同归一化因子的归一化方程, 以该方程为基础对不同应力路径下的泥炭质土进行归一化处理, 并对结果进行了验证, 效果良好。本研究可为泥炭质土地基上基坑在不同卸荷路径下的变形参数和本构关系的研究提供参考。

关键词: 泥炭质土; 卸荷路径; K_0 固结; 应力-应变; 初始切线模量; 归一化

中图分类号: TU411.3

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2023)02-0112-10

An experimental study of the stress-strain relationship of different excavation paths for soft soil K_0 consolidation

RUAN Yongfen¹, PAN Jiqiang¹, HU Jingkui², YAN Ming³, GUO Yuhang³

(1. Faculty of Civil Engineering and Mechanics, Kunming University of Science and Technology, Kunming, Yunnan 650500, China; 2. Kunming Prospecting Design Institute of China Nonferrous Metals Industry Co. Ltd., Kunming, Yunnan 650051, China;
3. China Railway 20th Bureau Group No.5 Engineering Co. Ltd., Kunming, Yunnan 650000, China)

Abstract: In the process of foundation pit excavation, the soil mass in different parts shows dynamic destruction characteristics due to diverse unloading mechanics. In order to study the complex unloading stress path in the foundation excavation, the TSZ-1S stress control triaxial compression apparatus is used to carry out the loading and unloading tests of the lacustrine sedimentary peat soil under the conditions of consolidation undrained and K_0 consolidation, respectively, and the test scheme is formulated according to different unloading conditions such as lateral, axial and axial lateral meantime unloading, so as to simulate the stress-strain curves of soil under different unloading paths in the foundation excavation and the variation laws of strength and initial tangent modulus under unloading shear failure. The test results show that the stress-strain characteristics of soil are closely related to the

收稿日期: 2022-06-07; 修订日期: 2022-10-24

投稿网址: www.swdgedz.com

基金项目: 中铁二十局集团第五工程有限公司科研计划项目(CR2005-5-JS-2021-009)

第一作者: 阮永芬(1964-), 女, 博士, 教授, 主要从事岩土工程研究。E-mail: rxyy64@163.com

stress path, and the stress-strain curves under each path are approximately hyperbolic. The strength of unloading shear failure is significantly lower than that of loading failure. The study of initial tangent modulus E_i under different unloading paths shows that E_i is greatly affected by lateral unloading, E_i increases after unloading, and axial unloading has little effect on it. The stress-strain curves are normalized, and the normalization equation of peat soil considering different normalization factors is constructed. Based on this equation, the peat soil under different stress paths is normalized, and the results are verified. The results of this work can provide reference for the study of deformation parameters and constitutive relations of foundation pits on peat soil sites under different unloading paths.

Keywords: peat soil; unloading path; K_0 consolidation; stress-strain; starting tangent modulus; normalization

随着深基坑工程数量、规模和深度的不断增加,深基坑土体开挖如何卸荷问题一直是岩土工程关注的重点。深基坑开挖过程中,不同部位土体经历不同卸荷路径后达到同一应力状态时所表现出的力学性状不同^[1-2]。湖相沉积软土层中分布有多层泥炭质土,其力学特性受基坑开挖等因素影响十分显著,仅采用常规三轴如不固结不排水(UU)试验、固结不排水(CU)试验的参数计算基坑开挖变形,无法真实反映泥炭质土在不同卸荷状态后的变形破坏机制^[3]。因此,加强对土体在不同卸荷路径下的力学特性研究,了解湖相沉积软土开挖卸荷的变形规律,才能采用合理参数及采取有效措施进行支护设计,确保工程安全。

国内外学者对不同土体卸荷后的力学特性进行了大量试验研究。如, Hsieh 等^[4]根据 Duncan-Chang 模型开发出考虑小应变模量及加卸荷准则的软黏土不排水模型,在基坑开挖工程中得到了良好验证;李德宁等^[5]研究不同深度不同土层在两种典型的卸荷应力路径下的变形特性,发现土的初始卸荷模量与最大回弹率不仅与土层性质有关还与所经历的卸荷应力路径、预压最大荷载有关;张玉等^[6]用真三轴仪对原状黄土进行卸载条件下平面应变试验,得出黄土在不同含水率下加、卸荷应变关系;杨爱武等^[7]对不同卸荷速率与路径下吹填土应力-应变关系与孔压变化曲线进行研究,建立了卸荷速率的破坏强度预测公式;李新明等^[8]考虑了卸荷速率与固结压力的影响,获得在被动拉伸和被动压缩路径下膨胀土应力-应变经验表达式;梅国雄等^[9]用平面应变仪对坑侧土体进行 K_0 固结侧向卸荷试验,得出了卸荷土体的应力-应变曲线也呈双曲线形态;陈志波等^[10]基于基坑不同开挖时期开展了多种室内试验,对比分析不同应力路径下土体抗剪强度、应力应变曲线及孔隙水压力变化特征,得出各路径下强度变化规律与强度差;陈立国等^[11]对重塑软土进行了超载预压—卸荷—再加载的一维

固结蠕变试验,软土压缩变形过程中主固结时间明显缩短;孟凡丽等^[12]总结了卸荷应力路径对饱和粉土动力特性的影响,发现在侧向卸荷时,存在临界动应力并且土体在卸荷再加荷应力路径下的临界动应力最小;Bakasubramanian 等^[13]通过绘制不排水试验的应力路径发现可用平均固结压力对其归一化,李作勤^[14]、曾国熙^[15]对其进行了验证。

综上所述,已有研究成果加深了对卸荷土体力学特性的认识^[16-17],但目前对于基坑卸荷研究的重点均基于开挖过程中的力学特性及侧向变形时地基沉降方法的研究^[18],而基坑开挖后各部位土体因经历不同卸荷路径后表现出的力学特性差异性的研究却鲜有报道。本文以昆明地区软土地基坑开挖为背景,以泥炭质土为试验对象,利用应力控制式三轴仪,开展原状泥炭质土 K_0 固结不排水三轴剪切系列试验研究,分析其不排水抗剪强度、固结压力及卸荷路径的关联性,对初始切线模量 E_i 与平均固结压力的相关性进行研究。基于 Duncan-Chang 模型建立考虑不同归一化因子的归一化方程,并对不同卸荷路径下的泥炭质土进行归一化处理,以期对昆明含泥炭质土地上的深基坑支护设计及施工提供试验及理论依据。

1 试验方案

试验用土取自昆明市昌宏西路清澜郡小区项目场地,取土深度 5 m,土体呈黑色,土样密封后运回试验室。试验土样直径 39.1 mm、高 80.0 mm,将其放入饱和缸中进行抽气饱和。剩余土样按《土工试验方法标准》(GBT 50123—2019)^[19]测定其物理指标:土样密度 1.02 g/cm³,天然含水率 37.2%,比重 1.96,孔隙比 4.55,有机质含量差异较大^[20],其平均值为 59.01%,纤维含量 11.57%。试验图片如图 1 所示。

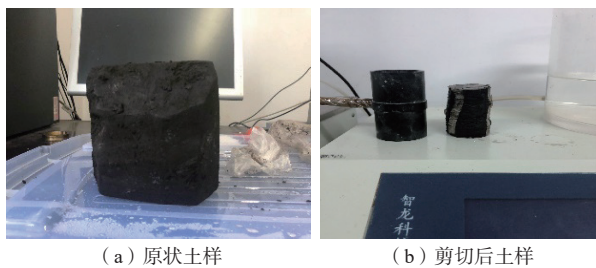


图 1 试验图片
Fig. 1 Test pictures

采用 TSZ-1S 应力控制式三轴仪进行 CU 试验,测定泥炭质土的内摩擦角(φ),计算静止土压力系数 $K_0 = 1 - \sin \varphi = 0.75$ 。 K_0 固结试验采用分级加载方法,每隔 2 h 加围压 25 kPa,同时施加相应的轴向荷载,固结过程中保持土样侧向不发生变形,当加载速率 $V \leq 0.0005$ mm/h,认为轴向变形稳定,固结完成。卸荷采用逐级卸载,卸载过程待每级卸荷后孔压达到稳定时再进行下一级卸荷。具体试验方案如表 1 所示,③组土样固结完成后在不排水条件下逐级卸荷直至土样破坏;④组、⑤组及⑥组试验固结过程结束后在排水条件下进行卸荷,卸荷结束后恢复至卸荷前的压力值进行不排水剪切。

表 1 不同卸荷路径下三轴剪切试验方案
Table 1 Triaxial shear test schemes under different unloading paths

试验 分组	σ_3 /kPa	固结方式	卸荷路径	剪切路径
①	100	等向固结	无	σ_3 不变, σ_1 逐渐增大
	150			
	225			
②	100	K_0 固结	无	σ_1 不变, σ_3 逐渐减小
	150			
	225			
③	100	K_0 固结	σ_3 每级减 10 kPa 至破坏 σ_3 每级减 15 kPa 至破坏 σ_3 每级减 20 kPa 至破坏	σ_1 不变, σ_3 逐渐减小
	150			
	225			
④	100	K_0 固结	$\sigma_3=100 \rightarrow 90 \rightarrow 80 \rightarrow 70 \rightarrow 60 \rightarrow 80 \rightarrow 100$ $\sigma_3=150 \rightarrow 135 \rightarrow 120 \rightarrow 105 \rightarrow 90 \rightarrow 120 \rightarrow 150$ $\sigma_3=225 \rightarrow 205 \rightarrow 185 \rightarrow 165 \rightarrow 145 \rightarrow 185 \rightarrow 225$	σ_1 不变, σ_3 逐渐增大
	150			
	225			
⑤	100	K_0 固结	每级 σ_3 变化与④组一致, σ_3 减小时沿 K_0 线减小 σ_1 , 后恢复至初始状态	σ_1 不变, σ_3 逐渐增大
	150			
	225			
⑥	100	K_0 固结	$\sigma_1=133 \rightarrow 128 \rightarrow 123 \rightarrow 118 \rightarrow 113 \rightarrow 123 \rightarrow 133$ $\sigma_1=200 \rightarrow 192 \rightarrow 185 \rightarrow 177 \rightarrow 170 \rightarrow 185 \rightarrow 200$ $\sigma_1=300 \rightarrow 290 \rightarrow 280 \rightarrow 270 \rightarrow 260 \rightarrow 280 \rightarrow 300$	σ_1 不变, σ_3 逐渐增大
	150			
	225			

注: σ_1 、 σ_3 分别表示大、小主应力。

深基坑开挖过程中,基坑周边土体经历的卸荷路径互不相同,本次试验考虑 3 种卸荷路径:坑侧土侧向卸荷而竖向应力不变(④组);坑角处土轴向、侧向应力均减小(⑤组);坑底土竖向应力减小侧向荷载不变(⑥组)。3 组试验完成后,与常规固结不排水(CU)试验(①组)、 K_0 固结加荷试验(②组)、 K_0 固结卸荷试验(③组)进行对比。各组试验剪切速率均取 0.08 mm/min,当剪应力有明显峰值时终止试验,无峰值时待轴向应变达 15% 时终止。

2 试验结果与分析

K_0 固结试验能很好地反映土体经历不同应力路径后的性状,因此重点研究各路径下剪切过程的应力-应变关系曲线,不考虑固结过程。Kondner^[21]提出当轴向应变(ε_a)与主应力差(q ,其值为 $\sigma_1 - \sigma_3$)的比值在坐标原点连续时,可以采用双曲线模拟应变硬化土体在三轴压缩条件下的应力-应变曲线。由于 K_0 固结产生的偏应力差(q_c)不计入剪切应力,其应力-应变曲线不经过坐标原点,故先对数据进行处理,即将剪切阶段的 q 减去固结时的 q_c ,然后在 $(q - q_c) - \varepsilon_a$ 坐标系下做出各组试验的应力-应变关系曲线,如图 2 所示。

从图 2 中可看出,在不同固结方式及卸荷路径下,泥炭质土的应力-应变曲线近似呈双曲线形态,存在明显的非线性特征,表现为明显的硬化型。相同应变下剪应力都随固结围压的增大而增加。其他情况不变时,在剪切开始阶段,围压为 100 kPa 与 150 kPa 的 2 条曲线剪应力的差值较小,围压为 225 kPa 的曲线与它们的差值较大;②、④组试验此类特征尤为明显。在剪应力($q - q_c$)相等时,③组应变 ε_a 比其他加荷试验大得多,如当围压为 225 kPa 时,在剪应力为 100 kPa 情况下,③组应变为 5.57% 而②组应变仅为 1.98%。

图 2(c)为土样侧向卸荷至发生破坏,到达破坏点的剪应力低于其余各加荷试验,随轴向应变的增加,各点分布越分散。当每级卸荷量相同时,卸荷稳定后的轴向应变随卸荷级数的增加急剧加大。侧向卸荷时土体由于侧向约束减小,导致强度降低,其峰值强度明显低于其余各组试验。在基坑开挖过程中侧向土体的卸荷将会使土体抗剪强度发生较大改变。坑侧土体在卸荷作用下破坏时的特征与加荷试验不同,其孔隙率增加,土体内被空气填充导致土颗粒间咬合作用和摩擦力均减小,进而导致强度降低^[22]。

在同一围压下, $(q - q_c) - \varepsilon_a$ 的关系如图 3 所示。从图 3 可看出,在低围压 100 kPa 和 150 kPa 时, CU 试验(①

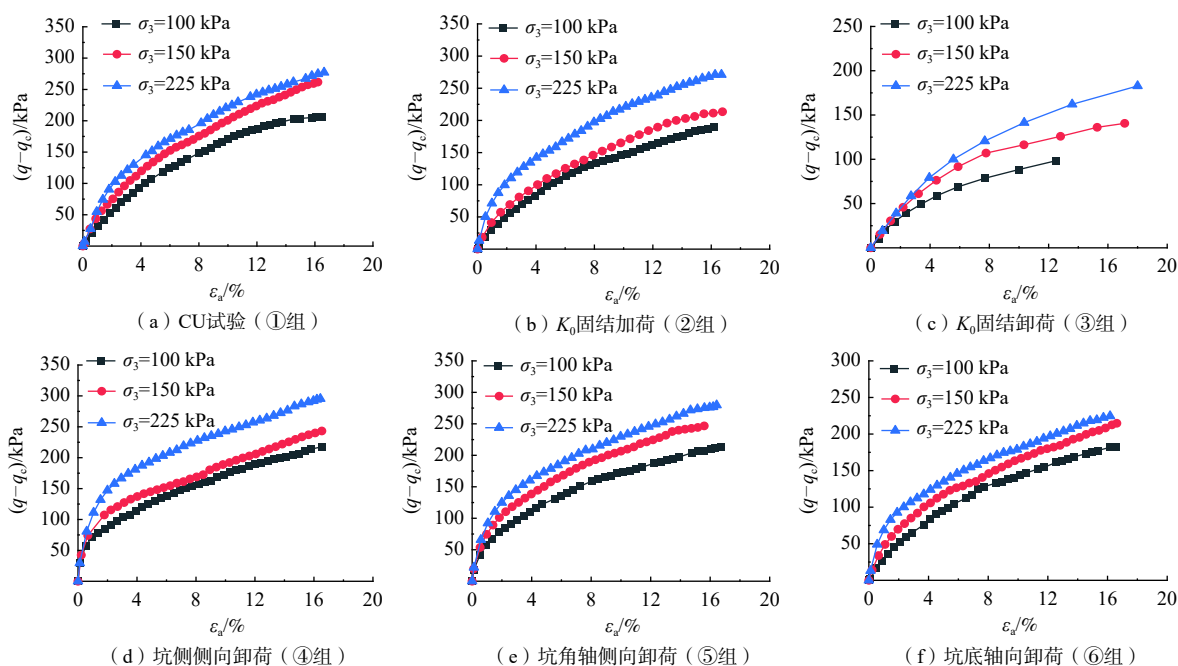


图2 各组试验应力-应变曲线

Fig. 2 Stress-strain curve of each group test

组)曲线峰值强度略大于 K_0 固结后各加荷试验的峰值强度,当围压提高至 225 kPa 时,除⑥组外又出现相反的现象。小应变时,④、⑤两组的曲线斜率在不同围压下均明显大于①组,这两组试验的共同点为卸荷

时侧向荷载有所降低,说明应力-应变曲线对此较为敏感,且在低应变时表现得更为明显。⑥组试验发生了轴向卸荷,由于竖向荷载的卸除,坑底的土体会发生隆起,使土体结构在剪切破坏时抗剪强度有所降低。

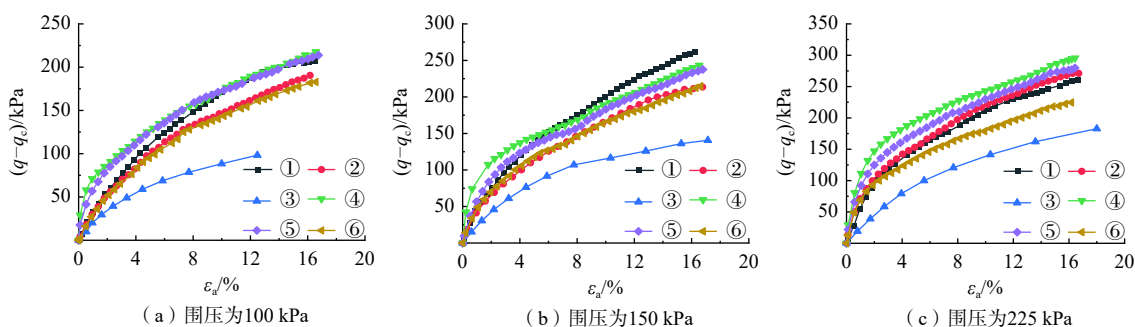


图3 同一围压下各组试验应力-应变曲线

Fig. 3 Stress-strain curve of each test group under the same circumferential pressure

综上所述,相同固结压力下不同卸荷路径后土体应力-应变曲线差异较大,主要表现在剪应力峰值和曲线斜率上。在剪切过程中,产生相同应变时剪应力大小始终呈现出曲线④>曲线⑤>曲线⑥的规律。在低围压 100 kPa 时,曲线④与曲线⑤剪应力的差值较小;其余情况下,当应变相同时 3 条曲线的剪应力均有明显差异。在剪切刚开始阶段,曲线⑥的斜率低于曲线④、⑤;④、⑤两组试验在卸荷时侧向约束均发生了减小,且此差异在围压较低时更为明显。将各组试验的应力-应变曲线用双曲线函数进行拟合,通过对本构

模型的研究将进一步发现其中的差异性。

3 Duncan-Chang 模型及其扩展

Kondner^[21] 于 1963 年基于固结排水试验提出的双曲线模型可以较好地反映各向同性固结土体在三轴压缩条件下的非线性关系。后经各学者研究,将其应用于固结不排水试验中,均取得了良好的效果^[23-24],区别在于对模量的定义不同。对于 CU 试验,曲线任一点的斜率为切线模量,其中 ε_a 为 0 处的切线模量又称为初始切线模量(E_t),在模型应用过程中, E_t 是重要

的参数。结合前文所述, K_0 固结完成时初始偏应力 q 不为 0, 鉴于此, 多位学者均建议在非线性模型中加入固结偏应力 q_c 的影响^[8, 25], 即:

$$\frac{\varepsilon_a}{q - q_c} = a + b\varepsilon_a \quad (1)$$

$$E_i = \frac{1}{a} \quad (2)$$

$$(\sigma_1 - \sigma_3)_u = \frac{1}{b} \quad (3)$$

式中: b 、 a ——拟合直线的斜率和截距/ kPa^{-1} ;

$(\sigma_1 - \sigma_3)_u$ ——极限偏应力/ kPa 。

对于③组侧向卸荷试验, 在试验过程中为保持轴向压力 σ_1 不变, 在减小围压 σ_3 的同时增大了主应力差, 使得 $d\sigma_2 = d\sigma_3 = -d(\sigma_1 - \sigma_3)$, 因此得到 $d\sigma_1 = 0$ 。周秋娟等^[26]亦证明了在总应力条件下可以定义卸荷模量(E_i)为切线变形模量 $d(\sigma_1 - \sigma_3)/d\varepsilon_a$ 。根据式(1)得到 $\varepsilon_a/(q - q_c) - \varepsilon_a$ 关系曲线如图 4 所示。

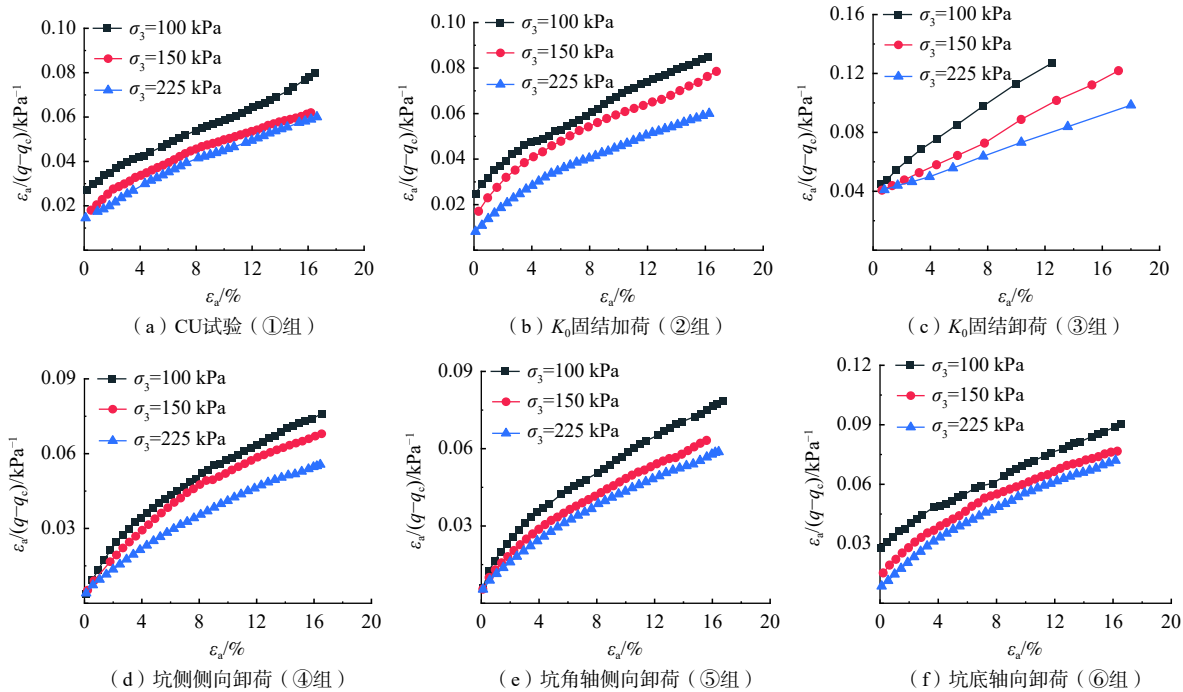


图 4 不同路径下初始切线模量
Fig. 4 Initial tangent modulus under different paths

由图 4 可知, 不同卸荷应力路径, 不同破坏条件下曲线均具有较好的线性关系, 线性拟合的拟合度 R^2 在 0.95 ~ 0.98 之间。线性拟合可得到各参数的取值范围, 其中③组试验因其产生剪应力方式的不同, 参数取值与其余各组有较大区别, a 为 0.031 3 ~ 0.039 4, b 为 0.003 4 ~ 0.005 9。其余各组参数取值相差不大, a 基本保持在 0.018 2 ~ 0.026 4 之间, b 在 0.002 1 ~ 0.003 4 之间。

定义平均固结应力(σ_m):

$$\sigma_m = (\sigma_1 + 2\sigma_3)/3 \quad (4)$$

将拟合参数值 a 、 b 代入式(2)(3), 可得到各路径下剪切时的 E_i 和极限偏应力。

为探究泥炭质土初始切线模量和固结压力间的关系, 根据文献^[26]建立 σ_m 与 E_i 的经验公式, 如式(5)

所示:

$$E_i = a_1 \sigma_m + a_2 \quad (5)$$

式中: a_1 、 a_2 ——拟合参数

E_i 与 σ_m 的拟合结果见表 2。通过拟合分析知, 各组拟合曲线相关系数均在 0.94 以上, 说明 E_i 与 σ_m 呈明显线性关系。同理, 平均固结应力与极限偏应力亦有同样的线性关系。

通过图 2 可看出切线模量的变化规律: 在同一应力路径下, 随固结围压增加, 各组曲线斜率增大, 初始切线模量不断增加, 即从等向固结与 K_0 固结的刚度上分析, 固结压力都会对其产生影响。对于此类性质, 王大雁等^[27]对人工冻土进行研究, 认为其由冻土中的冰受围压变化而引起, 而土体本身的刚度受固结围压影响较小。这表明不同类别土体的初始切线模量受

表 2 E_i 与 σ_m 拟合表达式及参数值Table 2 E_i and σ_m fitting expressions and parameter values

试验组	σ_m/kPa	E_i/MPa	R^2	表达式
①	100	33.84	0.998	$E_i = 0.199\ 1\sigma_m + 15.05$
	150	44.27		
	225	57.84		
②	111	31.91	0.958	$E_i = 0.265\ 5\sigma_m - 0.267\ 1$
	167	39.60		
	250	67.98		
③	111	23.02	0.986	$E_i = 0.061\ 4\sigma_m + 16.55$
	167	27.37		
	250	31.68		
④	111	62.77	0.945	$E_i = 0.357\ 6\sigma_m + 18.20$
	167	69.69		
	250	110.87		
⑤	111	57.01	0.947	$E_i = 0.218\ 4\sigma_m + 35.25$
	167	75.76		
	250	88.18		
⑥	111	30.62	0.999	$E_i = 0.242\ 5\sigma_m + 3.647$
	167	43.98		
	250	64.31		

围压的影响差异显著。

对比④、⑤、⑥组试验的 σ_m - E_i 关系式。3 组土样固结时的应力状态及剪切时的初始应力状态均相同,但在 E_i 及其表达式拟合时却表现出极大差异。因此卸荷路径对泥炭质土力学特性取值的影响不容忽视,忽略卸荷对其的影响或将不同卸荷一概而论的处理将会增加基坑支护设计的不合理性。参数 a_1 、 a_2 的取值应充分考虑其卸荷路径,不同路径对 a_1 、 a_2 取值的影响各不相同,具体计算时应按基坑开挖时卸荷路径对卸荷进行分类。

4 各应力路径下归一化特性

4.1 归一化方程建立

归一化是指将各个因素影响下的应力-应变关系借助归一化因子归结到一条狭窄曲线上,通过归一化方程的建立,仅需少量已知条件就可对特定曲线进行还原或预测。土力学普遍认为土体具有归一化性状,土体的应力-应变、强度、孔压、应力路径均可归一化^[28]。通过前文分析可知,泥炭质土剪切曲线近似为硬化形态,且通过坐标轴的转化可满足在曲线原点连续。基于此,采用双曲线模型并考虑不同归一化因子讨论泥炭质土应力-应变曲线的归一性。

令 K 为归一化因子,将其代入式(1),可得到式(6):

$$K \cdot a + K \cdot b \varepsilon_a = K \cdot \frac{\varepsilon_a}{q - q_c} \quad (6)$$

K 的选取需满足与初始切线模量和极限偏应力成正比关系,即与固结围压成正比关系。因此,令式(6)中各项满足如下条件:

$$m = K \cdot a = \frac{K}{E_i} \quad (7)$$

$$n = K \cdot b = \frac{K}{(\sigma_1 - \sigma_3)_u} \quad (8)$$

式中: m 、 n ——归一化系数。

将式(7)(8)代入式(6)可得:

$$K \cdot \frac{\varepsilon_a}{\sigma_1 - \sigma_3} = m + n \varepsilon_a \quad (9)$$

建立不同路径下的归一化方程,反映各卸荷路径对应力-应变曲线的影响。为简化问题,仅探究各组试验下固结围压对曲线的影响,将固结围压视为归一化应力,因此 K 必须为固结围压的一次函数,即 $K = f(\sigma_3)$ 。此时,归一化方程可表示为:

$$q - q_c = \frac{f(\sigma_3) \cdot \varepsilon_a}{m \cdot \varepsilon_a + n} \quad (10)$$

式(10)具有固定的结构,针对土体的种类及固结方式,选取不同的归一化因子对其进行归一化处理,考虑了固结方式对应力-应变曲线归一化的影响,可以将不同情况下的归一化方程进行联立。

4.2 归一化因子的选取

归一化因子的选取需满足与 E_i 、 $(\sigma_1 - \sigma_3)_u$ 成正比,且为围压的一次函数,这 3 个要求为 Kondner 双曲线方程的归一化条件^[29]。常用的归一化因子有 E_i 、 $(\sigma_1 - \sigma_3)_u$ 、 σ_3 、 σ_m 等,其中 E_i 和 $(\sigma_1 - \sigma_3)_u$ 较易满足归一化条件。联立式(7)和式(8)可得:

$$\frac{(\sigma_1 - \sigma_3)_u}{E_i} = \frac{m}{n} \quad (11)$$

由式(11)可知,不同围压下的应力-应变曲线可取 E_i 和 $(\sigma_1 - \sigma_3)_u$ 为归一化因子,归一化条件为二者互为正比例函数。

李作勤^[14]提出了用 σ_3 或 σ_m 为归一化因子并给出了相应的归一化条件:二者同时与 E_i 和 $(\sigma_1 - \sigma_3)_u$ 成正比。当以 σ_m 为归一化因子时,虽然条件苛刻,但多位学者^[3, 26]证明了三轴试验 K_0 固结时选择 σ_m 作为归一化因子,拟合效果较好。

现以 CU 试验(①组)、 K_0 固结加荷试验(②组)为例绘出 E_i 、 $(\sigma_1 - \sigma_3)_u$ 与 σ_3 的关系如图 5。由图 5 可知, CU 试验条件下 σ_3 与 E_i 、 $(\sigma_1 - \sigma_3)_u$ 存在较好的线性关系, K_0 固结条件下 E_i 与 σ_3 线性关系不太明显,故以 σ_3 为归一化因子在本文中不适用。由式(5)可知 E_i 和

$(\sigma_1 - \sigma_3)_u$ 成正比, 因此本文 CU 试验采用 E_i 作为归一化因子, 其余各组采用 σ_m 作为归一化因子, 对昆明地区泥炭质土在不同应力路径不同围压下在各坐标系下进行归一化拟合, 其结果如图 6 所示。由图 6 可知, 在应变较小时各点分布较均匀, 应变增大时各点分布越离散。

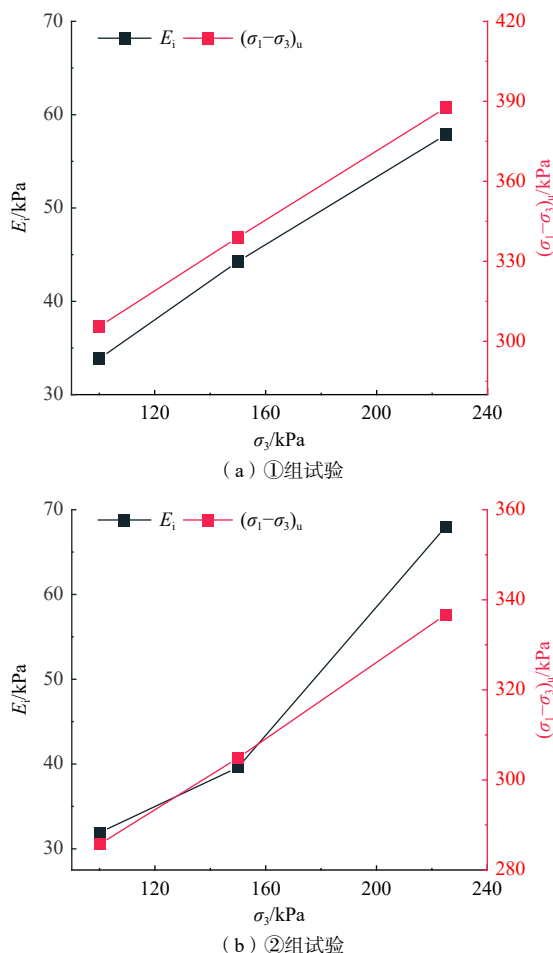


图 5 ①、②组试验 E_i 、 $(\sigma_1 - \sigma_3)_u$ 随 σ_3 变化关系
Fig. 5 Relationship of E_i , $(\sigma_1 - \sigma_3)_u$ and σ_3 in groups ① and ② tests

以 E_i 为归一化因子, 建立 CU 试验昆明泥炭质土归一化方程, 见式(12); 以 σ_m 为归一化因子, 建立 K_0 固结下昆明泥炭质土归一化方程, 见式(13):

$$q - q_c = \frac{a_1 \sigma_3 + a_2}{f + e \varepsilon_a} \cdot \varepsilon_a \quad (12)$$

$$q - q_c = \frac{2\sigma_3 + \sigma_1}{3(e\varepsilon_a + f)} \cdot \varepsilon_a \quad (13)$$

式中: e 、 f ——图 6 中归一化方程斜率和截距。

使用不同归一化因子对各路径下昆明地区泥炭质土不同围压下的曲线进行预测并与试验曲线进行

对比, 如图 7 所示。

对比图 7 中预测与试验曲线, 当围压为 100 kPa 或 150 kPa 时, 应变较小时预测结果与试验曲线相差不大, 应变较大时存在一定误差; 围压为 225 kPa 时, 应变为 5%~16% 时预测结果较好。总体来说, 以双曲线非线性弹性模型为基础, 各应力路径下归一性良好, 区别在于归一化方程不同。

4.3 抗剪强度归一化

根据摩尔-库伦准则, 土体破坏时的主应力差 $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ 为:

$$(\sigma_1 - \sigma_3)_f = \frac{2c \cos \varphi + 2\sigma_3 \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \quad (14)$$

式中: c 、 φ ——土体黏聚力、内摩擦角。

根据上文对建立归一化方程进行验证, 结果表明: 各压力下当应变为 4%~15% 时, 预测与试验结果较为吻合, 且昆明地区泥炭质土不排水剪切试验中应力-应变曲线形态多为硬化型。对于硬化型试样, 常取应变为 15% 为破坏点, 因此取轴向应变 15% 所对应的偏应力为破坏偏应力较为合理。结合前文建立的归一化方程, 即式(10), 可求得总应力抗剪强度指标, 如式(15)所示:

$$(\sigma_1 - \sigma_3)_f = \frac{2c \cos \varphi + 2\sigma_3 \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} = \frac{15f(\sigma_3)}{15m + n} \quad (15)$$

5 结论

(1) 不同围压下不同卸荷路径的应力-应变关系均呈双曲线形态, 但不同卸荷条件下曲线的形态均有差异, 其应力-应变关系与应力路径之间存在密切联系, 侧向卸荷后土体峰值强度和初始切线模量均大于轴向卸荷后的土体, 且侧向卸荷后土体的初始切线模量有所提高。

(2) 采用 Kondner 双曲线拟合不同路径不同围压下泥炭质土的应力-应变曲线, 其拟合度较高。根据公式计算出初始切线模量后, 采用经验公式建立了拟合度较好的平均固结压力与初始切线模量的线性表达式。经验证, 各组土样的初始切线模量随固结围压的增加而增加。

(3) 昆明泥炭质土的应力-应变关系曲线具有归一性, 针对不同固结方式应选取不同归一化因子进行归一化处理(即 CU 试验选用初始切线模量, K_0 固结试验选用平均固结应力), 建立不同路径下泥炭质土归一化方程。将预测值与试验值对比, 其拟合效果较好。

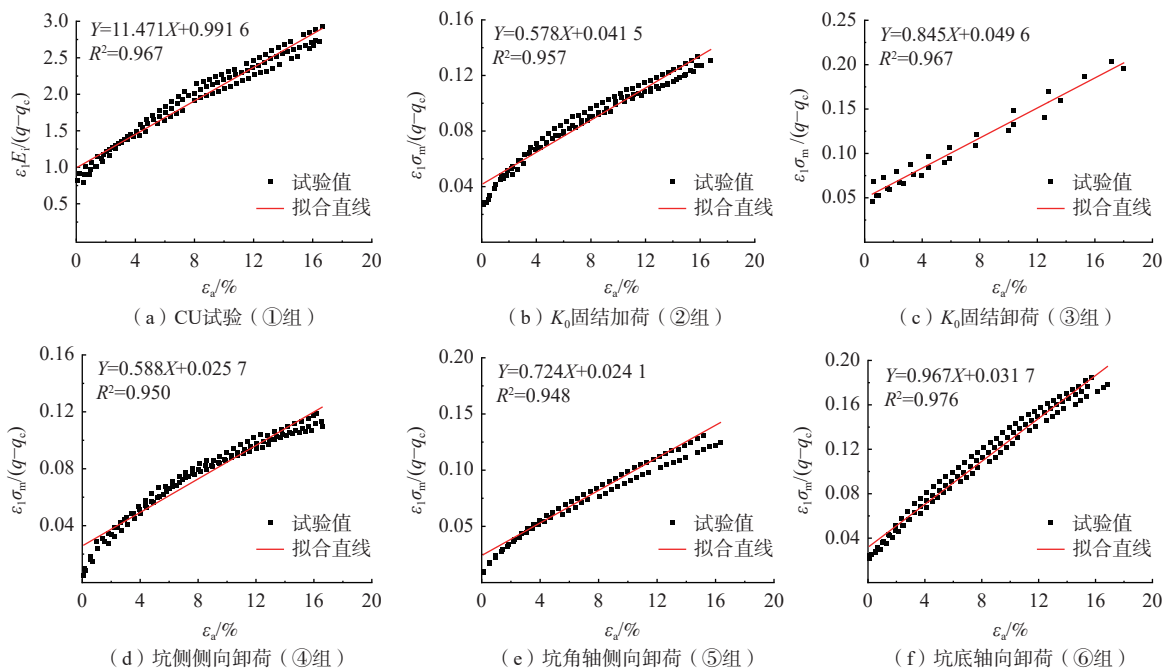


图6 昆明泥炭质土应力-应变归一化曲线

Fig. 6 Normalized stress-strain curve of the Kunming peaty soil

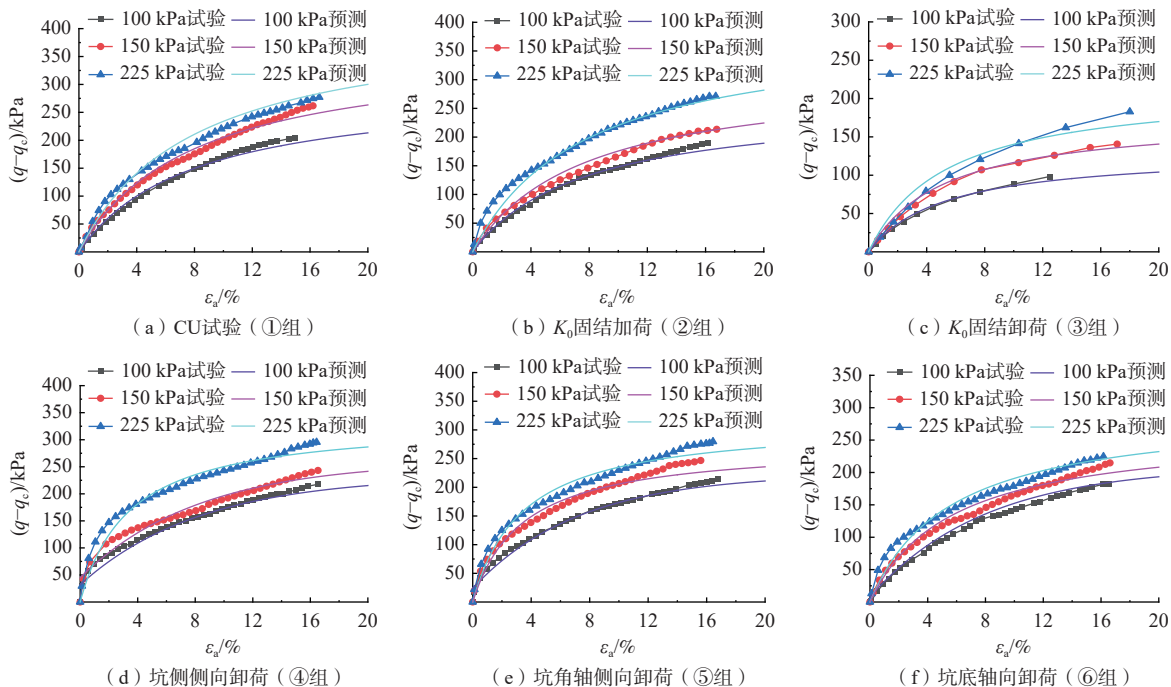
注: (a)图中 $Y=\varepsilon_1\sigma_m/(q-q_c)$, 其余图中 $Y=\varepsilon_1\sigma_m/(q-q_c)$; $X=\varepsilon_a$ 

图7 昆明泥炭质土应力-应变预测曲线

Fig. 7 Predicted stress-strain curve of the Kunming peaty soil

参考文献 (References):

- [1] LAMBE W T. Stress path method[J]. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 1967, 93(6): 309 – 331.
- [2] 李立云, 王子英, 王晓静, 等. 近铁路基坑通风井段变

形特征及其机制分析. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2021, 51(5): 1441 – 1451. [LI Liyun, WANG Ziying, WANG Xiaojing, et al. Study on deformation characteristics of ventilation shaft section in foundation pit excavation adjacent to railway. *Journal of Jilin University*

- (Earth Science Edition), 2021, 51(5): 1441 – 1451. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 陈善雄, 凌平平, 何世秀, 等. 粉质黏土卸荷变形特性试验研究[J]. *岩土力学*, 2007, 28(12): 2534 – 2538. [CHEN Shanxiong, LING Pingping, HE Shixiu, et al. Experimental study on deformation behavior of silty clay under unloading[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2007, 28(12): 2534 – 2538. (in Chinese with English abstract)]
- [4] HSIEH P G, OU C Y. Analysis of nonlinear stress and strain in clay under the undrained condition[J]. *Journal of Mechanics*, 2011, 27(2): 201 – 213.
- [5] 李德宁, 楼晓明, 杨敏. 上海地区基坑开挖卸荷土体回弹变形试验研究[J]. *岩土力学*, 2011, 32(增刊2): 244 – 249. [LI Dening, LOU Xiaoming, YANG Min. Experimental researches on unloading resilient deformation properties during excavations in Shanghai area[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, 32(Sup2): 244 – 249. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 张玉, 邵生俊. 平面应变加、卸荷条件下黄土的非线性变形特性的研究[J]. *岩土工程学报*, 2015, 37(增刊1): 185 – 190. [ZHANG Yu, SHAO Shengjun. Non-linear deformation behaviors of loess under plane strain state of vertical loading and lateral unloading[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2015, 37(Sup1): 185 – 190. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 杨爱武, 杨少坤, 张振东. 基于不同卸荷速率与路径影响下吹填土力学特性研究[J]. *岩土力学*, 2020, 41(9): 2891 – 2900. [YANG Aiwu, YANG Shaokun, ZHANG Zhendong. Experimental study of mechanical properties of dredger fill under different unloading rates and stress paths[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2020, 41(9): 2891 – 2900. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 李新明, 孔令伟, 郭爱国. 考虑卸荷速率的 K_0 固结膨胀土应力-应变行为[J]. *岩土力学*, 2019, 40(4): 1299 – 1306. [LI Xinming, KONG Lingwei, GUO Aiguo. Stress-strain behavior of expansive soil under K_0 condition with different unloading rates[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2019, 40(4): 1299 – 1306. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 梅国雄, 陈浩, 卢廷浩, 等. 坑侧土体卸荷的侧向应力-应变关系研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2010, 29(增刊1): 3108 – 3112. [MEI Guoxiong, CHEN Hao, LU Tinghao, et al. Research on lateral stress-strain relation on side of foundation pit with lateral unloading[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2010, 29(Sup1): 3108 – 3112. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 陈志波, 钟理峰, 蔡廉锦, 等. 基坑开挖过程坑侧土体应力路径试验研究[J]. *防灾减灾工程学报*, 2016, 36(6): 943 – 949. [CHEN Zhibo, ZHONG Lifeng, CAI Lianjin, et al. Stress pathtriaxial tests on the lateral soil of foundation pit during excavation process[J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2016, 36(6): 943 – 949. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 陈立国, 吴昊天, 陈晓斌, 等. 超载预压处理软土的次固结特征及沉降计算[J]. *水文地质工程地质*, 2021, 48(1): 138 – 145. [CHEN Ligu, WU Haotian, CHEN Xiaobin, et al. Secondary consolidation characteristics and settlement calculation of soft soil treated by overload preloading[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2021, 48(1): 138 – 145. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 孟凡丽, 娄桢桢, 葛威. 长期循环荷载下卸荷粉土动力特性的试验研究[J]. *岩土力学*, 2022, 43(增刊1): 383 – 388. [MENG Fanli, LOU Zhenzhen, GE Wei. Experimental study on dynamic characters of unloading silt under long-term cyclic loading[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2022, 43(Sup1): 383 – 388. (in Chinese with English abstract)]
- [13] BALASUBRAMANIAM A S, CHAUDRY A R. Deformation and strength characteristics of soft bangkok clay[J]. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 1978, 104(9): 1153 – 1167.
- [14] 李作勤. 粘土归一化性状的分析[J]. *岩土工程学报*, 1987, 9(5): 67 – 75. [LI Zuqin. Analysis of normalized properties of clay[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1987, 9(5): 67 – 75. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 曾国熙. 正常固结黏土不排水剪切的归一化性状[C]//软土地基学术讨论会论文集. 北京: 水利出版社, 1980: 13 – 26. [ZENG Guoxi. Normalized properties of normally consolidated clay soils in undrained shear[C]//Proceedings of the Symposium on Soft Ground Foundation. Beijing: Water Resources Press, 1980: 13 – 26. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 余志华, 桂跃, 付坚, 等. 轴向卸荷条件下泥炭质土回弹变形试验研究[J]. *水文地质工程地质*, 2015, 42(5): 107 – 114. [YU Zhihua, GUI Yue, FU Jian, et al. An experimental study of the rebound deformation characteristics and mechanism of peaty soil under unloading[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*,

- 2015, 42(5): 107 – 114. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 吴昞, 朱俊高, 黄浩然, 等. 不同密度粉质粘土 K_0 固结侧向卸荷三轴试验研究[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2022, 39(3): 49 – 55. [WU Yi, ZHU Jungao, HUANG Haoran, et al. Triaxial test study on K_0 consolidation of different density silty clays with lateral unloading[J]. Journal of Hebei University of Engineering (Natural Science Edition), 2022, 39(3): 49 – 55. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 周洪福, 冯治国, 石胜伟, 等. 川藏铁路某特大桥成都侧岸坡工程地质特征及稳定性评价[J]. 水文地质工程地质, 2021, 48(5): 112 – 119. [ZHOU Hongfu, FENG Zhiguo, SHI Shengwei, et al. Slope engineering geology characteristics and stability evaluation of a grand bridge to Chengdu bank on the Sichuan-Tibet Railway[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2021, 48(5): 112 – 119. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 土工试验方法标准: GB/T 50123—2019[S]. 北京: 中国计划出版社, 2019. [Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for geotechnical testing method: GB/T 50123—2019[S]. Beijing: China Planning Press, 2019. (in Chinese)]
- [20] 苟富刚, 龚绪龙, 陆徐荣, 等. 有机质对海相软土物理力学特性的影响效应分析[J]. 水文地质工程地质, 2022, 49(5): 195 – 203. [GOU Fugang, GONG Xulong, LU Xurong, et al. Effect of organic matter content on physical-mechanical properties of sea soft soil[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2022, 49(5): 195 – 203. (in Chinese with English abstract)]
- [21] KONDNER R L. Hyperbolic stress-strain response: Cohesive soils[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 1963, 89(1): 115 – 143.
- [22] 刘熙媛. 基坑开挖过程的试验与数值模拟及土的微观结构研究[D]. 天津: 天津大学, 2004. [LIU Xiyuan. Experimental and numerical simulation of excavation process and microstructure study[D]. Tianjin: Tianjin University, 2004. (in Chinese with English abstract)]
- [23] 蒋海飞, 刘东燕, 黄伟, 等. 高围压下不同孔隙水压作用时岩石蠕变特性及改进西原模型[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(3): 443 – 451. [JIANG Haifei, LIU Dongyan, HUANG Wei, et al. Creep properties of rock under high confining pressure and different pore water pressures and a modified Nishihara model[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(3): 443 – 451. (in Chinese with English abstract)]
- [24] 张挺, 彭世龙, 曹广勇, 等. 膨胀土侧向卸荷试验研究及归一化特性分析[J]. 水利水电技术(中英文), 2023, 54(1): 175 – 186. [ZHANG Ting, PENG Shilong, CAO Guangyong, et al. Experimental study on lateral unloading of expansive soil and analysis of normalized characteristics[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2023, 54(1): 175 – 186. (in Chinese with English abstract)]
- [25] 郭小帅. 基坑开挖中土体侧向卸荷特性研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2012. [GUO Xiaoshuai. Research on the lateral unloading behavior of soils in deep excavation[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2012. (in Chinese with English abstract)]
- [26] 周秋娟, 陈晓平. 侧向卸荷条件下软土典型力学特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(11): 2215 – 2221. [ZHOU Qiujuan, CHEN Xiaoping. Test research on typical mechanical characteristics of soft clay under lateral unloading condition[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(11): 2215 – 2221. (in Chinese with English abstract)]
- [27] 王大雁, 马巍, 常小晓, 等. 深部人工冻土在小应变条件下的刚度特性[J]. 岩土力学, 2006, 27(9): 1447 – 1451. [WANG Dayan, MA Wei, CHANG Xiaoxiao, et al. Small-strain stiffness properties of frozen soils in deep alluvium[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(9): 1447 – 1451. (in Chinese with English abstract)]
- [28] VARDANEGA P J, BOLTON M D. Stiffness of clays and silts: Normalizing shear modulus and shear strain[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2013, 139(9): 1575 – 1589.
- [29] 谢飞. 基于结构性力学参数的黄土归一化性状研究: 以延安地区马兰黄土为例[D]. 西安: 长安大学, 2021. [XIE Fei. Research on the normalized properties of loess based on structural parameters— A case of Malan loess in Yan'an area[D]. Xi'an: Chang'an University, 2021. (in Chinese with English abstract)]

编辑: 刘真真