

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2024.040



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



# 泥炭土静止侧压力系数影响因素试验研究

欧明喜<sup>1</sup>, 李强<sup>1</sup>, 韩忠玉<sup>2</sup>

(1. 昆明理工大学建筑工程学院, 昆明 650500; 2. 西昌学院土木与水利工程学院, 四川 西昌 615000)

**摘要:** 静止侧压力系数  $K_0$  是解决岩土类工程问题的重要参数。为研究泥炭土  $K_0$  的影响因素和作用机理, 采用  $K_0$  固结仪对昆明滇池泥炭土开展侧限压缩试验, 系统分析了竖向应力、有机质含量和初始孔隙比对  $K_0$  的影响规律, 并从结构性角度探讨  $K_0$  变化规律的形成机理。结果表明: 重塑泥炭土的静止侧压力系数不是恒定常数, 而是与竖向应力和有机质含量有关; 加载时  $K_0$  随竖向应力的增加而减小, 最后趋于稳定, 且在较低竖向应力下  $K_0$  的减小趋势更显著; 同一竖向应力下, 有机质含量越大,  $K_0$  越小, 整个加载过程  $K_0$  下降幅度越大; 泥炭土结构性在加载过程中的动态变化是引起  $K_0$  变化的根本原因, 竖向应力和有机质通过影响其结构性进而影响  $K_0$ , 且两者间存在一定的耦合关系; 重塑泥炭土稳定后  $K_0$  值在 0.42~0.6 之间, 低于无机黏土, 并与有机质含量存在线性负相关, 基于试验结果提出了相应的拟合关系式; 初始孔隙比与  $K_0$  值的关系较为离散。

**关键词:** 泥炭土; 静止侧压力系数; 侧限压缩试验; 结构性; 有机质含量

**中图分类号:** TU411.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2026)02-0090-10

## Experimental study on influencing factors of the coefficient of earth pressure at rest of peat soil

OU Mingxi<sup>1</sup>, LI Qiang<sup>1</sup>, HAN Zhongyu<sup>2</sup>

(1. Faculty of Civil Engineering and Mechanics, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, P. R. China; 2. Department of Civil & Hydraulic Engineering, Xichang University, Xichang 615000, Sichuan, P. R. China)

**Abstract:** The coefficient of earth pressure at rest  $K_0$  is an important parameter for geotechnical engineering. In order to study the influencing factors and mechanisms of peat soil  $K_0$ , a  $K_0$  consolidation instrument was used to conduct a lateral compression test on Kunming Dianchi peat soil. The effects of vertical stress, organic matter content and initial void ratio on  $K_0$  were systematically analyzed, and from the structural perspective, the formation mechanism of its  $K_0$  change law was explored. The test results show that the coefficient of earth pressure at rest of reshaped peat soil is not a constant, but is related to the vertical stress and content of organic matter;  $K_0$  decreases with the increase of vertical stress during loading and finally tends to be stable. The decreasing trend of  $K_0$  under stress is more significant; under the same vertical stress, the greater the organic matter content of the soil sample, the smaller  $K_0$ , and the greater the decrease in  $K_0$  during the entire loading process; the dynamic changes in the structural properties of peat soil during the loading process are the fundamental cause of changes in  $K_0$ . Vertical stress and organic matter affect  $K_0$  by affecting its structural

**收稿日期:** 2024-01-09

**基金项目:** 国家自然科学基金(51968036)

**作者简介:** 欧明喜(1983-), 男, 博士, 副教授, 主要从事特殊岩土力学研究, E-mail: 19590927@163.com。

**Received:** 2024-01-09

**Foundation item:** National Natural Science Foundation of China (No. 51968036)

**Author brief:** OU Mingxi (1983-), PhD, associate professor, main research interests: special rock and soil mechanics, E-mail: 19590927@163.com.

properties, and there is a certain coupling relationship between the two; the  $K_0$  value after stabilization of reshaped peat soil is between 0.42 and 0.6, which is lower than that of inorganic clay, and has a linear negative correlation with the organic matter content. Based on the experimental results, a corresponding fitting relationship is proposed; the relationship between the initial void ratio and the  $K_0$  value is relatively discrete.

**Keywords:** peat soil; coefficient of earth pressure at rest; confined compression test; structural property; organic matter content

静止侧压力系数  $K_0$  是土体在无侧向变形条件下侧向有效应力与竖向有效应力之比<sup>[1]</sup>。 $K_0$  对确定支挡结构上的土应力分布、桩与土之间的相互作用以及土体水平方向应力的变化等方面至关重要<sup>[2-3]</sup>。在解决岩土工程的诸多问题时常需引入  $K_0$ , 以计算土体的初始应力状态, 该系数是许多工程设计和分析中的重要参数。

学者们对各类土体的  $K_0$  系数进行了大量研究。Brooker 等<sup>[4]</sup> 分析了黏性土应力历史对  $K_0$  的影响; 蔡正银等<sup>[5-6]</sup> 探讨了不同粒径和初始相对密度下砂土  $K_0$  的变化规律; 陈树峰等<sup>[7]</sup> 分析了超固结粉质黏土层  $K_0$  的分布规律, 总结出超固结比与  $K_0$  的关系, 提出适用于超固结土层  $K_0$  的计算方法; 陈存礼等<sup>[8]</sup> 考虑了含水率及加载卸荷状态对  $K_0$  系数的影响, 发现其变化规律与黄土的结构性有关; 蒋明杰等<sup>[9]</sup> 探讨了初始相对密度与粗颗粒土  $K_0$  的关系, 总结出粗颗粒土静止侧压力系数的经验公式。这些研究表明,  $K_0$  系数不仅与土的种类有关, 而且还受应力历史、超固结比、初始相对密度和土体结构性等因素的影响。

泥炭土广泛分布于云南地区, 随着城市基础设施建设的发展, 在该类土层上进行工程建设已不可避免。作为最具挑战性的天然地基土之一, 其高含水率、高压缩性等极差的工程性质使得岩土工程师需要对泥炭土的各种参数进行更加严格和全面的分析, 掌握泥炭土  $K_0$  的影响因素和机理对岩土工程的分析及设计有着重要价值。虽然关于  $K_0$  影响因素和机理的研究成果颇多, 但研究对象大多是无机黏土或砂土, 对于泥炭土  $K_0$  的相关研究极少。Hayashi 等<sup>[10]</sup>、Mesri 等<sup>[11]</sup>、Edil 等<sup>[12]</sup> 对多个地区泥炭土进行了  $K_0$  试验, 但由于泥炭土往往形成蜂窝状、球状或架空结构等特殊结构形式<sup>[13]</sup>, 其结构性弱于其他软土, 现有对于  $K_0$  影响因素的研究也集中在压力历史和超固结比方面, 大多未考虑泥炭土结构性的影响, 且未对其影响机理进行具体分析。

近年来研究发现, 一些土颗粒间的相互作用会随着荷载的施加而发挥作用<sup>[14]</sup>, 泥炭土内部富含的有机质也会影响黏聚力和内摩擦角<sup>[15]</sup>, 这些因素可能会对  $K_0$  产生影响。鉴于此, 笔者以云南滇池地区

泥炭土为对象, 采用  $K_0$  固结仪对不同有机质含量的重塑泥炭土进行侧限压缩试验, 研究竖向应力、有机质含量和初始孔隙比对  $K_0$  的影响规律, 并结合土体结构性特征分析其影响机理, 提出泥炭土  $K_0$  与有机质含量的拟合关系式。

## 1 试验基本情况

### 1.1 试验土样及试验方案

试验所用泥炭土取自滇池周边的6个场地, 如图1所示。场地五、场地六的泥炭土散发出较浓的腥臭味, 土样疏松, 失水后产生明显的干缩现象, 且含有少量未完全分解的动植物残体; 其他场地的泥炭土呈软塑状态, 以黏粒为主, 主要呈层状及透镜体状分布, 干缩现象不明显。



图1 泥炭土取样点

Fig. 1 Sampling points of peat soil

泥炭土土样见图2。试样为饱和重塑环刀样, 直径为61.8 mm, 高度为40 mm, 制样方法参照《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)<sup>[16]</sup>。将制好的泥炭土试样放入饱和缸中进行真空抽气饱和, 直到饱和缸中的水不再产生气泡为止, 继续浸泡24 h, 即认为土样达到饱和状态。



图2 泥炭土土样

Fig. 2 Peat soil sample

泥炭土试样基本物理指标如表 1 所示。为研究不同初始孔隙比  $e_0$  对泥炭土  $K_0$  的影响,在土样原有初始孔隙比的基础上,为每个场地的泥炭土额外制备 4 组不同初始孔隙比的试样。制备方法为:将取回的泥炭土风干碾碎,根据目标孔隙比和试样体积计算得到所需土样质量,通过控制土样质量得到不同初始孔隙比的试样。其中,  $T_{1-1}$ 、 $T_{2-1}$ 、 $T_{3-1}$ 、 $T_{4-1}$ 、 $T_{5-3}$  和  $T_{6-3}$  六组试样维持各场地天然初始孔隙比不变,用于分析竖向应力、有机质含量对  $K_0$  的影响。共计 30 组试样,每组均设置两次平行试验。

表 1 泥炭土试样基本物理指标

Table 1 Basic physical indexes of peat soil samples

场地	比重 $G_s$	孔隙比 $e$	饱和密度 $\rho_{sat}/(g/cm^3)$	有机质含量 $w_u/\%$
场地一	2.78	2.15	1.88	9.11
场地二	2.55	2.37	1.86	18.31
场地三	2.45	2.40	1.87	19.51
场地四	2.13	3.40	1.47	39.54
场地五	1.60	4.85	1.10	65.23
场地六	1.57	6.77	1.07	79.58

## 1.2 试验原理与方法

根据有效应力原理<sup>[17]</sup>,饱和土体所承受的总应力  $\sigma$  等于有效应力  $\sigma'$  与孔隙水压力  $\mu$  之和,即  $\sigma = \sigma' + \mu$ 。因此,施加第一级竖向压力的瞬间,土体内产生超静孔隙水压力,此时有效应力为 0;随着固结时间的不断增加,孔隙中的水排出,孔隙水压力  $\mu$  不断减小,有效竖向应力  $\sigma'_v$  和有效侧向应力  $\sigma'_h$  不断增加,如式(1)所示。每级试验中施加的总竖向应力  $\sigma_v$  保持不变,固结完成后,总竖向应力  $\sigma_v$  完全转化为有效竖向应力  $\sigma'_v$ ,总侧向应力  $\sigma_h$  部分转化为有效侧向应力  $\sigma'_h$ , $\sigma'_h$  与  $\sigma'_v$  的比值即为静止侧压力系数  $K_0$ ,如式(2)所示。

$$K_0 = \frac{\sigma_h}{\sigma_v} = \frac{\sigma'_h + \mu}{\sigma'_v + \mu} \quad (1)$$

$$K_0 = \frac{\sigma'_h}{\sigma'_v} \quad (2)$$

试验所用仪器由南京土壤仪器有限公司生产的单杠杆固结仪、GJY 型  $K_0$  固结仪、压力传感器(最大量程为 1 MPa,准确度为 0.25% F. S)和孔隙压力仪组成,试验装置见图 3。将试样置于  $K_0$  固结仪内的橡皮膜(厚度约 0.4 mm)中,充水后的橡皮膜与刚性侧壁组成圆形密闭压力室,在限制试样侧向变形的同时,以水为传力介质将试样的侧向压力传递至压力传感器。压力传感器安装于压力室侧壁的中间高度位置,通过监测压力室内的水压力间接确定试样的侧向压力,数据在孔隙压力仪上显示。

为提高  $K_0$  的测量精度,压力室内使用无气泡



图 3 试验装置

Fig. 3 Test device

水,注水时通过循环注入无气泡水排尽室内空气和残余气泡,以减小水体压缩性,保证试样始终处于侧限状态且侧向压力得到有效传递;装样前,抽出压力室中的部分水,使橡皮膜向内凹进,减小试样与橡皮膜的摩擦,装样后再将水压回压力室,使橡皮膜紧贴试样。

根据规范<sup>[18]</sup>,将制备好的饱和土样放入固结仪容器内,先施加 1 kPa 预压应力,待孔隙压力仪读数为 0 后,施加第一级竖向应力。按照 0→25→50→100→200→300→400 kPa 的顺序分级加荷。每 30 min 记录一次孔隙压力仪的读数,直至变形稳定后再施加下一级竖向应力。试样变形稳定标准设定为每小时变形不大于 0.01 mm。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 侧向应力与竖向应力的关系

部分学者针对泥炭土在加载时侧向应力与竖向应力的关系开展研究,但得出的结论不一致。Edil 等<sup>[12]</sup>认为,泥炭土的侧向应力与竖向应力有良好的线性关系,二者的比值在整个加载阶段内是恒定的,即  $K_0$  近似为常数。Hayashi 等<sup>[10]</sup>认为,在加载过程中,泥炭土侧向应力与竖向应力为非线性关系, $K_0$  值随竖向应力的变化而变化。

基于静止侧压力系数试验结果,不同有机质含量  $w_u$  下泥炭土的侧向应力  $\sigma'_h$  与竖向应力  $\sigma'_v$  的关系曲线如图 4 所示。

从图 4 可以发现,在加载过程中,竖向应力增加时,试样的侧向应力随之增加; $\sigma'_h$ - $\sigma'_v$  曲线整体的增长趋势为线性增长,在竖向应力较小(25~100 kPa)时表现为下凹曲线,且曲率皆较小,在  $\sigma'_v > 100$  kPa 后逐渐变为线性趋势,这说明饱和重塑泥炭土的  $K_0$  仅在竖向应力较小时发生改变,在达到一定竖向应

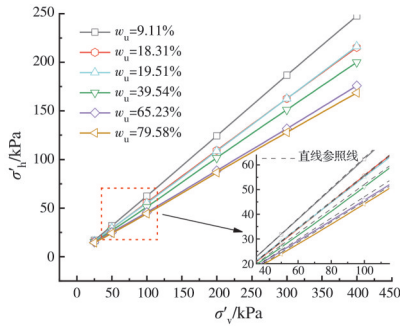


图 4 加载时侧向应力与竖向应力的关系曲线  
**Fig. 4 Horizontal stress and vertical stress curves during loading**

力后保持恒定。

此外,侧向应力与竖向应力的关系还与泥炭土的有机质含量有关。 $\sigma'_h$ - $\sigma'_v$ 关系曲线随着 $w_u$ 的减小逐渐上移,且整体线性特征更明显, $K_0$ 变化幅度减小,恒定后的 $K_0$ 增大。

**2.2 竖向应力与 $K_0$ 的关系**

**2.2.1 泥炭土结构性与 $K_0$ 的关系**

Hayashi等<sup>[10]</sup>和Mesri等<sup>[11]</sup>分别研究了日本北海道和加拿大原状泥炭土,发现原状泥炭土 $K_0$ 的变化主要受应力历史影响;加载过程中,在超固结阶段 $K_0$ 迅速减小,当竖向应力大于前期固结压力、泥炭土进入正常固结状态后, $K_0$ 降幅减小,并逐渐趋于稳定;试样的侧限压缩曲线存在一个拐点,该拐点对应的竖向应力即为原状土的前期固结压力。

图5为加载过程中不同有机质含量 $w_u$ 下饱和重塑泥炭土 $K_0$ 的变化曲线,可以看出:在整个加载过程中, $K_0$ 并不是一个固定值,不同有机质含量下 $K_0$ - $\sigma'_v$ 关系曲线均呈下降趋势;当 $\sigma'_v$ 较小时, $K_0$ 迅速降低,随着 $\sigma'_v$ 的增大,这种趋势逐渐变缓并趋于稳定,当 $\sigma'_v$ 较大时, $K_0$ 值几乎为常数。

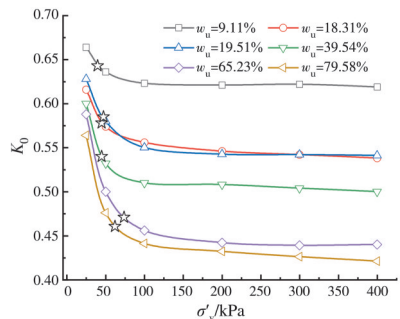


图 5 不同有机质含量下泥炭土 $K_0$ 随 $\sigma'_v$ 的变化曲线  
**Fig. 5 Variation curves of  $K_0$  of peat soil with  $\sigma'_v$  under different organic matter contents**

图6为饱和重塑泥炭土的 $e$ - $\lg \sigma'_v$ 曲线,曲线上可见一个明显的拐点;拐点前土的压缩性较小,曲线较平缓,拐点后土的压缩性则显著增大。

由图5、图6可知,重塑泥炭土与原状土的 $K_0$ -

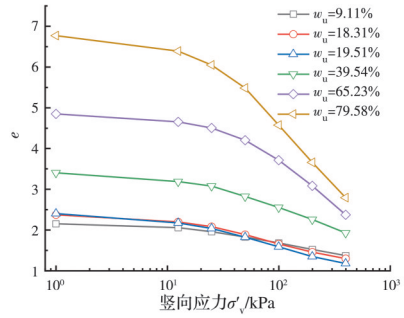


图 6 不同有机质含量下泥炭土的 $e$ - $\lg \sigma'_v$ 曲线  
**Fig. 6  $e$ - $\lg \sigma'_v$  curves of peat soil under different organic matter contents**

$\sigma'_h$ - $e$ - $\lg \sigma'_v$ 关系规律相似,压缩过程中同样存在类似于原状泥炭土的“前期固结压力”和“超固结”特征。这与一般黏性土的试验结果不同:原状黏土的 $K_0$ - $\sigma'_v$ - $e$ - $\lg \sigma'_v$ 关系曲线通常表现出明显的非线性,而重塑土的曲线几乎呈线性变化<sup>[19-20]</sup>。笔者认为,这一反常特性与加载过程中竖向应力及有机质对泥炭土结构性的影响有关。

传统的前期固结压力是指土体在历史上受到的最大竖向荷载,一般针对原状土而言。然而随着研究的深入,研究者发现其本质是土体压密效果的体现,不仅受固结压力的影响,一些能够改变土颗粒排列松紧程度的因素同样可能导致前期固结压力变化<sup>[14]</sup>。压缩曲线拐点对应的应力实际上是土的前期固结压力 $p_c$ 和结构强度 $q$ 之和,该应力用结构屈服应力 $p_s$ 表示<sup>[21-22]</sup>。对于重塑土,制样时人为施加的压力同样可以压密土样,这也是重塑土的 $e$ - $\lg \sigma'_v$ 曲线可能出现拐点的原因。

于庆博等<sup>[14]</sup>将土体的压密效果纳入结构性的范畴,认为土体的结构性体现为颗粒排列和结构联结。其中,颗粒排列指土颗粒间相互接触排列的紧密程度,表现为土体的压密,是固结压力等多种作用力的综合体现;结构联结是土中相互作用力的总称,包括土颗粒间的咬合、摩擦和各类化学胶结作用等,其存在可形成抵抗变形的额外强度,即结构强度。结构强度与土体的压密均会影响结构屈服应力 $p_s$ ,使土体表现出“超固结”特性。重塑土在压密作用力、水分与黏粒的相互作用及土颗粒间的咬合镶嵌等作用下,同样会具有结构强度。

由此可见,泥炭土 $K_0$ 曲线的“前期固结压力”和“超固结”特征实际上是由竖向应力等压力因素造成的土体压密与自身结构联结形成的结构强度共同作用的结果,本质上是土体结构性的表现。无论是天然泥炭土还是重塑泥炭土,其 $K_0$ 的特征都与结构性有关,区别在于二者结构性强弱的不同。

### 2.2.2 竖向应力对结构性和 $K_0$ 的影响机理分析

为进一步研究竖向应力的压密效果对静止侧压力系数的作用机理,可在  $v\text{-lg } \sigma'_v$  曲线中采用 Butterfield<sup>[23]</sup> 提出的双对数法确定泥炭土的结构屈服应力,其中  $v=\ln(1+e)$ ,如图 7 所示,两条直线交点对应的竖向应力即为结构屈服应力  $p_s$ 。该方法相比传统的 Casagrande 方法更简便、准确,且能减小人为因素带来的误差<sup>[24]</sup>。

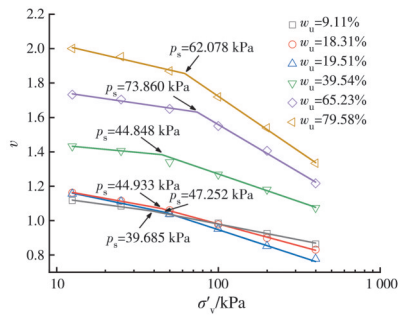


图 7 双对数压缩曲线

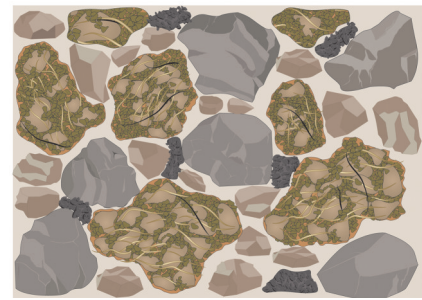
Fig. 7 Double logarithmic compression curves

将图 7 中对应的结构屈服应力  $p_s$  标注到图 5 中,以“☆”号表示。可以看出,  $p_s$  与  $K_0\text{-}\sigma'_v$  曲线中  $K_0$  由快速下降转变为缓慢下降的分界点基本一致。表明竖向应力对  $K_0$  的影响与泥炭土的结构性有关。

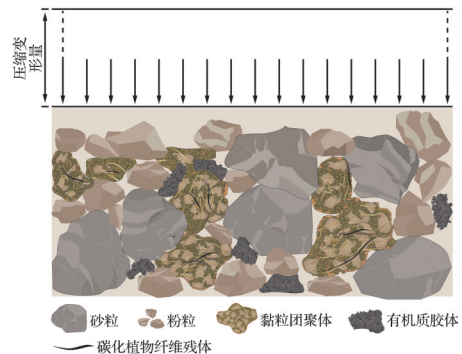
泥炭土主要由砂粒、粉粒、腐殖质-黏粒团聚体、腐殖质胶体及植物纤维残体构成<sup>[25]</sup>。黏粒间主要依靠水膜和腐殖质胶结,由于腐殖质胶体稳定性较差,对于重塑泥炭土而言,大部分化学胶结作用已被破坏,其结构性主要来源于土颗粒间的相互作用、水膜与黏粒的联结作用以及压密形成的更紧密的颗粒排列,且该结构性会随着竖向应力的施加而发生变化。

在加载初期,因受到制样时所施加压力的影响,重塑土已具有一定结构性,与原状土应力历史的压密作用相似,土样也表现出一定密实状态下的特性。如图 8 所示,随着竖向应力的增大,土体继续被压密,大、中孔隙被压缩,水膜联结作用力被克服。土颗粒开始重新调整排列位置,发生位移和转动,砂粒、粉粒间的接触面积随之增大,形成颗粒排列的基本骨架;黏粒团聚体体积亦被压缩,位置不断调整至骨架之间,土样整体形成相对稳定状态。

一方面,形成土骨架的砂粒、粉粒间的咬合、镶嵌与摩擦作用力逐渐发挥作用<sup>[26-27]</sup>;另一方面,由于荷载有利于胶结作用的发挥,形成团聚体的部分腐殖质胶体和黏粒本身也可作为胶结物<sup>[13]</sup>,分散在大颗粒间形成一定的结构联结,提高土骨架抵抗变形的能力。压密后的土体结构性提高,竖向力链增强,竖向应力向水平方向传播的程度降低( $K_0$  值降



(a) 初始状态



(b) 压密状态

图 8 泥炭土微结构压缩示意图<sup>[25]</sup>

Fig. 8 Schematic diagram of peat soil microstructure compression<sup>[25]</sup>

低)。此外,土体压密过程还可能有利于增强植物纤维等有机质组分对  $K_0$  的作用效果。

当竖向应力大于结构屈服应力后,土颗粒间原有的各类联结作用基本全部破坏,颗粒重新排列基本完成,粉粒及砂粒逐步压缩靠近,形成新的次生结构。既有颗粒排列和结构联结不再变化,土体的结构渐趋稳定。这就是当竖向应力超过结构屈服应力后,  $K_0$  下降速度变缓,最终趋于稳定的原因。

综上所述,竖向应力会压密土体,改变颗粒排列,增强颗粒间的相互作用和土体结构联结,使土体形成相对稳定的状态,进而影响土体的结构性和  $K_0$ 。

### 2.3 有机质与 $K_0$ 的关系

#### 2.3.1 有机质对结构性和 $K_0$ 的影响

由图 5、图 6 可知,随着有机质含量的增加,  $K_0$  随竖向应力下降的幅度增大,结构屈服的转折点也更为显著,因而泥炭土的结构性和  $K_0$  与其有机质含量必然存在联系。

图 9 为各级竖向应力下  $K_0$  与有机质含量  $w_u$  的关系曲线,由图 9 可知:各级竖向应力下,泥炭土  $K_0$  与  $w_u$  均呈非线性关系,  $K_0$  随  $w_u$  的增大而减小;低有机质含量下曲线间隔较小,整个加载过程中  $K_0$  下降较少,高有机质含量时曲线间隔大,  $K_0$  下降较多。这与图 5 所示的规律一致,说明竖向应力对  $K_0$  的影

响与泥炭土的有机质含量有关,  $w_u$  越大, 整个加载过程  $K_0$  下降幅度越大。

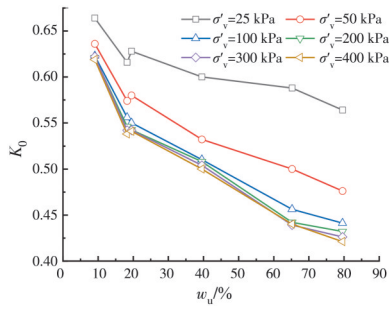


图 9 不同竖向应力下泥炭土  $K_0$  随  $w_u$  变化曲线  
Fig. 9 Variation curves of  $K_0$  of peat soil with  $w_u$  under different vertical stresses

图 9 中 25、50、100 kPa 时 3 条曲线的下降坡度依次增大, 200、300、400 kPa 时 3 条曲线的坡度则较为接近。这表明有机质含量对  $K_0$  的影响程度在竖向应力为 25~100 kPa 范围内逐渐增大, 在 100 kPa 以后基本保持稳定。结合泥炭土的结构屈服应力可初步推测, 在结构屈服强度附近有有机质对  $K_0$  的影响已完全体现, 即有机质对  $K_0$  的影响作用随竖向应力的增大逐渐显著, 在达到结构屈服应力附近时完全发挥。

2.3.2 有机质作用机理分析

泥炭土中的有机质组分主要为腐殖质及未分解或半分解的植物纤维残体<sup>[28]</sup>, 见图 10。从 3 个方面分析有机质组分对泥炭土结构性和  $K_0$  的影响。

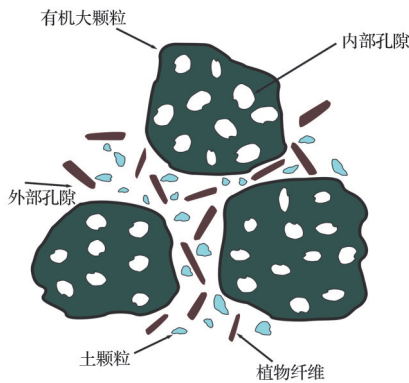
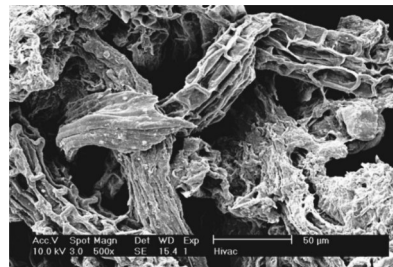


图 10 泥炭土成分示意图<sup>[30]</sup>  
Fig. 10 Schematic diagram of peat soil composition<sup>[30]</sup>

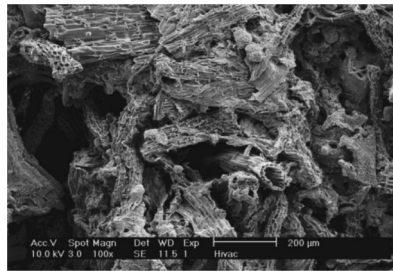
1) 腐殖质胶体的填充作用。腐殖质是一类复杂的高分子聚合物, 一般呈胶体状态, 可吸附包裹在黏粒表面, 也可作为游离的腐殖质分布在颗粒间的孔隙中<sup>[28-29]</sup>。因天然结构被破坏, 重塑土中游离腐殖质较多, 此类游离腐殖质颗粒会作为填充物留存在孔隙中, 进一步减小孔隙体积, 提高土体的压密效果。

2) 植物纤维的“加筋”作用。泥炭土中存在大

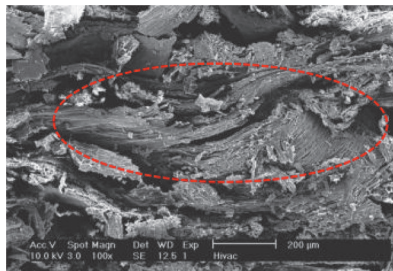
量植物纤维残体, 此类植物纤维纵横交错于土颗粒间。随着竖向压力的增加, 土体被压密, 植物纤维被拉伸, 压缩错动面上的纤维间组成“互锁”结构; 在较高竖向压力下, 纤维与周围基质材料一起形成一层相对坚硬的泥炭垫, 如图 11 所示。一方面, 这种毛毡式的交织作用在纤维和周围基质材料间产生摩擦阻力, 提高了土体的内摩擦角; 另一方面, 植物纤维本身的抗拉强度远大于泥炭基质, 可为土体提供内部横向阻力<sup>[11]</sup>, 从而提高土体的结构性。上述作用均会使试样加载过程中的抗侧向变形作用增强, 水平向应力的增长速率相对缓慢,  $K_0$  值随之降低。



(a) 水平方向交织在一起的植物纤维网络



(b) 竖直方向的植物纤维和基质材料 ( $\sigma'_v=0$  kPa)



(c) 竖直方向形成的泥炭垫 ( $\sigma'_v=200$  kPa)

图 11 James Bay 泥炭土电镜扫描图<sup>[11]</sup>

Fig. 11 SEM images of James Bay peat soil<sup>[11]</sup>

综上所述, 在腐殖质胶体和植物纤维对土体结构性的增强作用下,  $K_0$  呈现出随有机质含量的增加而降低的趋势。为进一步验证有机质对土体结构性的增强作用, 根据图 7, 将不同有机质含量及对应的结构屈服应力绘制成图 12。

由图 12 可知, 结构屈服应力随有机质含量的增大基本呈上升趋势。需说明的是: 有机质组分与分

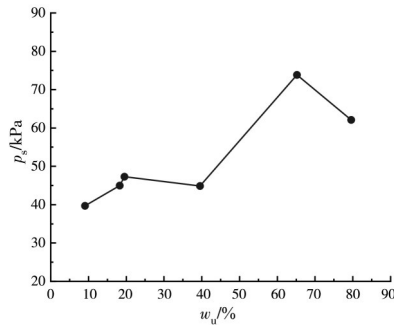


图 12 结构屈服应力与有机质含量的关系

Fig. 12 Relationship between structural yield stress and organic matter content

解度有关,分解度越低,土中植物纤维残余越多;分解度越高,腐殖质所占比例相对越大。Edil等<sup>[12]</sup>通过测量不同分解程度泥炭土的 $K_0$ 值,得出分解程度越大 $K_0$ 值越大的结论,说明相比腐殖质胶体的填充作用,植物纤维的“加筋”作用对土体结构性的影响更为显著。这可能是造成 $K_0-w_u$ 曲线非线性以及 $p_s-w_u$ 曲线中有机质含量为39.54%、79.58%时土样屈服应力较小的原因。

3)有机质含量与竖向应力的耦合作用。结合以上分析可知,有机质含量和竖向应力都与 $K_0$ 有关,且两者之间存在相互影响,这主要源于土体压密与结构联结的耦合作用。一方面,植物纤维等有机质组分提供的土体结构性随竖向应力的增大逐渐显现,荷载的施加有利于发挥土颗粒间的咬合、镶嵌与摩擦作用以及有机质中植物纤维加筋作用等结构联结的效果。另一方面,结构联结的增强反过来也会抵抗竖向应力的作用,削弱后续的压密效果<sup>[14]</sup>,进而影响土体 $K_0$ 随竖向应力的下降幅度。这种结构联结与颗粒排列的相互耦合关系在泥炭土中主要表现为有机质和竖向应力的相互作用。由于两者既可同步变化,又存在相互影响,有机质和竖向应力的耦合作用效果难以完全区分。

以 $K_0-\sigma'_v$ 曲线稳定后的值作为泥炭土的 $K_0$ 值,如表2所示。

无机黏土的 $K_0$ 值范围为0.45~0.65<sup>[11]</sup>,由表2可知,重塑泥炭土的 $K_0$ 值分布在0.42~0.62范围

表 2 泥炭土试样  $K_0$  值

Table 2  $K_0$  values of peat soil samples

有机质含量/%	静止侧压力系数
9.11	0.621
18.31	0.542
19.51	0.542
39.54	0.504
65.23	0.440
79.58	0.426

内,略小于无机黏土。Mesri等<sup>[11]</sup>的研究也表明,重塑泥炭土的 $K_0$ 值虽大于原状泥炭土,但仍小于无机黏土;而泥炭土 $K_0$ 值偏小,正是由于植物纤维增大了土体的内摩擦角。

根据表2可整理出不同有机质含量下的 $K_0$ 值,如图13所示。由图13可知,泥炭土 $K_0$ 值随有机质含量的增加而减小,二者关系可用直线近似拟合,拟合公式为

$$K_0 = -0.00243w_u + 0.60621 \quad (3)$$

式(3)的拟合曲线与试验点较吻合,决定系数 $R^2$ 达0.912,拟合效果良好。这与Hayashi等<sup>[10]</sup>针对泥炭土有机质含量与 $K_0$ 值关系所建立的拟合公式相近。

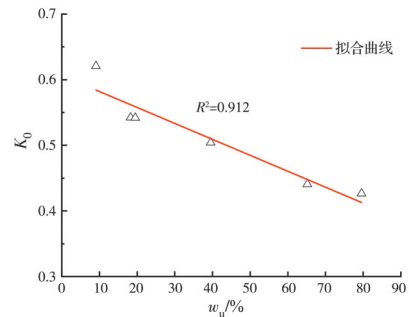


图 13 重塑泥炭土有机质含量与  $K_0$  的关系

Fig. 13 Relationship between organic matter content and  $K_0$  of remolded peat soil

### 2.4 初始孔隙比与 $K_0$ 的关系

初始孔隙比 $e_0$ 是控制土体力学行为的重要因素。研究表明,作为反映土体密实度的指标,黏土的初始孔隙比会影响其初始结构性;随 $e_0$ 的增大,土颗粒排列逐渐松散,产生的黏聚力及颗粒间的摩擦、咬合作用减小, $c$ 和 $\varphi$ 均随之减小,土体初始状态下的整体强度降低<sup>[31]</sup>。

为研究 $e_0$ 对泥炭土结构性及 $K_0$ 的影响,对不同初始孔隙比的重塑土样开展静止侧压力系数试验,得到结构屈服应力 $p_s$ 及稳定后的 $K_0$ 值;图14、图15分别为试验获得的 $e_0$ 与 $p_s$ 、 $e_0$ 与 $K_0$ 的关系曲线。

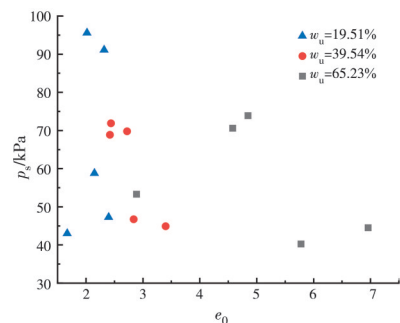
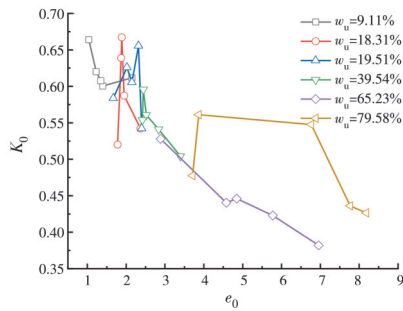


图 14 初始孔隙比与结构屈服应力的关系

Fig. 14 Relationship between initial void ratio  $e_0$  and structural yield stress  $p_s$

图15 初始孔隙比与 $K_0$ 的关系Fig. 15 Relationship between initial void ratio  $e_0$  and  $K_0$ 

由图14、图15可知,  $e_0$ 与 $K_0$ 、 $\rho_s$ 的相关性较差; 同一有机质含量下 $K_0$ 随初始孔隙比的变化无明显规律性。这可能是由于重塑土的胶结作用遭到破坏, 土体初始结构性较差, 使得初始孔隙比对结构屈服应力和 $K_0$ 的影响较小。此外, 泥炭土中有机质植物纤维内存在大量微孔隙, 此类孔隙孔径较小, 对土颗粒排列等结构性影响不大, 但会增加土体孔隙比, 使得初始孔隙比不能完全反映土体的初始密实度, 从而导致结果的无规律性。

综合可知, 泥炭土结构性与 $K_0$ 的影响机制十分复杂; 加载时 $e_0$ 对土体 $K_0$ 的影响规律及机理与一般软土存在显著差异, 有必要开展进一步研究。

### 3 结论

通过对多场地滇池重塑泥炭土进行侧限压缩试验, 从土体结构性角度分析了竖向应力、有机质含量和初始孔隙比对静止侧压力系数的影响规律与作用机理, 得出以下结论:

1) 泥炭土的静止侧压力系数 $K_0$ 与其结构性有关,  $K_0$ 的大小及变化规律是土体压密引发的颗粒排列变化与自身结构联结形成的结构强度共同作用的结果。

2) 加载时,  $K_0$ 随竖向应力 $\sigma'_v$ 的增大而减小, 且随着 $\sigma'_v$ 的持续增大, 其减小趋势逐渐变缓并最终趋于恒定; 同一竖向应力下, 有机质含量 $w_u$ 越大,  $K_0$ 越小, 整个加载过程的 $K_0$ 下降幅度越大。重塑泥炭土和原状泥炭土的 $K_0$ 变化规律具有一致性。

3) 竖向应力的施加使泥炭土被压密, 增大了颗粒间的相互作用和土体结构联结, 促使土体形成相对稳定状态; 有机质组分中腐殖质胶体的填充作用和植物纤维的“加筋”作用进一步加强了土体的压密效果和结构联结; 二者共同提高了土体的结构性, 降低了竖向应力向水平方向的传递程度, 进而使得 $K_0$ 减小。

4) 竖向应力对 $K_0$ 的影响程度随有机质含量的增大而增大, 有机质对 $K_0$ 的影响作用随竖向应力的

增大逐渐显著; 有机质形成的结构性反向削弱了竖向应力的压密作用, 二者的作用效果相互耦合。

5) 重塑泥炭土稳定后的 $K_0$ 值介于0.42~0.62之间, 低于无机黏土, 且随有机质含量的增加呈线性减小特征, 二者关系可用 $K_0 = -0.00243w_u + 0.60621$ 描述。

6) 重塑泥炭土的初始孔隙比 $e_0$ 与 $K_0$ 、 $\rho_s$ 的相关性较差, 可能与植物纤维中存在大量微孔隙或重塑土样破坏了土体天然结构有关, 对此有必要开展进一步研究。

### 参考文献

- [1] 强跃, 赵明阶, 林军志, 等. 静止土压力系数探究[J]. 岩土力学, 2013, 34(3): 727-730.  
QIANG Y, ZHAO M J, LIN J Z, et al. Research on coefficient of earth pressure at rest [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(3): 727-730. (in Chinese)
- [2] 朱俊高, 蒋明杰, 陆阳洋, 等. 应力状态对粗颗粒土静止侧压力系数影响试验研究[J]. 岩土力学, 2019, 40(3): 827-833, 851.  
ZHU J G, JIANG M J, LU Y Y, et al. Experimental study on influence of stress state on at-rest earth pressure coefficient for coarse grained soil [J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(3): 827-833, 851. (in Chinese)
- [3] 朱孟龙, 张庆文, 徐国林, 等. 考虑塔形滑移面的浅埋隧道松动土压力研究[J]. 应用力学学报, 2020, 37(5): 2197-2206, 2333-2334.  
ZHU M L, ZHANG Q W, XU G L, et al. Calculation of loose earth pressure in shallow tunnel considering soil arching effect [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2020, 37(5): 2197-2206, 2333-2334. (in Chinese)
- [4] BROOKER E W, IRELAND H O. Earth pressures at rest related to stress history [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1965, 2(1): 1-15.
- [5] 蔡正银, 朱洵, 代志宇. 考虑密度影响的砂土静止土压力系数研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(8): 1664-1671.  
CAI Z Y, ZHU X, DAI Z Y. Coefficient of earth pressure at rest of sand considering density effect [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(8): 1664-1671. (in Chinese)
- [6] 蔡正银, 代志宇, 徐光明, 等. 颗粒粒径和密实度对砂土 $K_0$ 值影响的离心模型试验研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(12): 3882-3888.  
CAI Z Y, DAI Z Y, XU G M, et al. Effect of particle size and compaction on  $K_0$  value of sand by centrifugal model test [J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(12): 3882-3888. (in Chinese)
- [7] 陈树峰, 孔令伟, 罗滔. 超固结粉质黏土水平应力释放

- 特征与静止侧压力系数计算方法[J]. 岩土力学, 2022, 43(1): 160-168.
- CHEN S F, KONG L W, LUO T. Lateral stress release characteristics of overconsolidated silty clay and calculation method for lateral earth pressure coefficient at rest [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2022, 43(1): 160-168. (in Chinese)
- [8] 陈存礼, 贾亚军, 金娟, 等. 含水率及应力对原状黄土静止侧压力系数的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(增刊1): 3535-3542.
- CHEN C L, JIA Y J, JIN J, et al. Influence of moisture content and stress on static lateral pressure coefficient of undisturbed loess [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2017, 36(Sup 1): 3535-3542. (in Chinese)
- [9] 蒋明杰, 朱俊高, 何顺宾. 初始相对密度对粗颗粒土  $K_0$  影响试验研究[J]. 工程科学与技术, 2019, 51(4): 69-74.
- JIANG M J, ZHU J G, HE S B. Experimental study on influence of initial relative density on  $K_0$  of coarse grained soil [J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2019, 51(4): 69-74. (in Chinese)
- [10] HAYASHI H, YAMAZOE N, MITACHI T, et al. Coefficient of earth pressure at rest for normally and overconsolidated peat ground in Hokkaido Area [J]. *Soils and Foundations*, 2012, 52(2): 299-311.
- [11] MESRI G, AJLOUNI M. Engineering properties of fibrous peats [J]. *Journal of Geotechnical and Environmental Engineering*, 2007, 133(7): 850-866.
- [12] EDIL T B, DHOWIAN A W. At-rest lateral pressure of peat soils [J]. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 1981, 107(2): 201-217.
- [13] 蒋忠信. 滇池泥炭土[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 1994: 32-40.
- JIANG Z X. Dianchi peat soil [M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 1994: 32-40. (in Chinese)
- [14] 于庆博, 王清, 李兴华, 等. 土结构性的动态特征与概念表达[J]. 工程地质学报, 2022, 30(6): 1914-1928.
- YU Q B, WANG Q, LI X H, et al. Dynamic characteristics and concept expression of soil structure [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2022, 30(6): 1914-1928. (in Chinese)
- [15] O' KELLY B C. Measurement, interpretation and recommended use of laboratory strength properties of fibrous peat [J]. *Geotechnical Research*, 2017, 4(3): 136-171.
- [16] 土工试验方法标准: GB/T 50123—2019 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2019.
- Standard for geotechnical testing method: GB/T 50123—2019 [S]. Beijing: China Planning Press, 2019. (in Chinese)
- [17] ZHANG Z C, CHENG X H. Effective stress in saturated soil: A granular solid hydrodynamics approach [J]. *Granular Matter*, 2014, 16(5): 761-769.
- [18] 铁路工程土工试验规程: TB 10102—2023 [S]. 北京: 中国铁道出版社有限公司, 2023.
- Code for soil test of railway engineering: TB 10102—2023 [S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2023. (in Chinese)
- [19] 陈波, 胡云世, 张效忠. 湖相软粘土力学特性的试验研究[J]. 水文地质工程地质, 2014, 41(3): 76-81.
- CHEN B, HU Y S, ZHANG X Z. An experimental study of the mechanical behavior of lacustrine soft clay [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2014, 41(3): 76-81. (in Chinese)
- [20] 黄博, 胡俊清, 廖先斌, 等. 原状饱和黏土静止土压力系数试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(增刊2): 4056-4064.
- HUANG B, HU J Q, LIAO X B, et al. Experimental study on static earth pressure coefficient of undisturbed saturated clay [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2013, 32(Sup 2): 4056-4064. (in Chinese)
- [21] 宋亚亚, 朱佩宁, 卢廷浩, 等. 干湿循环作用下非饱和和重塑黏土变形特性研究[J]. 地下空间与工程学报, 2022, 18(4): 1219-1225, 1240.
- SONG Y Y, ZHU P N, LU T H, et al. Experimental study of wetting-drying cycle on deformation behaviors of unsaturated remoulded clay [J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2022, 18(4): 1219-1225, 1240. (in Chinese)
- [22] 王丽琴, 邵生俊, 赵聪, 等. 黄土初始结构性对其压缩屈服的影响[J]. 岩土力学, 2018, 39(9): 3223-3228, 3236.
- WANG L Q, SHAO S J, ZHAO C, et al. Effect of initial structural property of loess on its compressive yield [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2018, 39(9): 3223-3228, 3236. (in Chinese)
- [23] BUTTERFIELD R. A natural compression law for soils (an advance on  $e$ -log  $p'$ ) [J]. *Géotechnique*, 1979, 29(4): 469-480.
- [24] 朱楠, 刘春原, 赵献辉, 等. 湿地湖泊相黏土一维固结压缩特性宏微观试验研究[J]. 长江科学院院报, 2020, 37(2): 93-99.
- ZHU N, LIU C Y, ZHAO X H, et al. Macroscopic and microscopic experimental research on one-dimensional consolidation compressibility of marshy-lacustrine clay [J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2020, 37(2): 93-99. (in Chinese)
- [25] 桂跃, 余志华, 刘海明, 等. 高原湖相泥炭土固结系数

- 变化规律试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(增刊1): 3259-3267.
- GUI Y, YU Z H, LIU H M, et al. Experimental study on the variation law of consolidation coefficient of lacustrine peat soil in plateau [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(Sup 1): 3259-3267. (in Chinese)
- [26] WANG J J, YANG Y, BAI J P, et al. Coefficient of earth pressure at rest of a saturated artificially mixed soil from oedometer tests [J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2018, 22(5): 1691-1699.
- [27] LEE J, LEE D, PARK D. Experimental investigation on the coefficient of lateral earth pressure at rest of silty sands: Effect of fines [J]. Geotechnical Testing Journal, 2014, 37(6): 967-979.
- [28] 裴利华, 杨醒宇, 桂跃, 等. 有机质含量及组分对泥炭土物理力学性质影响[J]. 水文地质工程地质, 2022, 49(2): 77-85.
- PEI L H, YANG X Y, GUI Y, et al. Influence of organic matter content and ingredient on the physical and mechanical properties of peat soils [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2022, 49(2): 77-85. (in Chinese)
- [29] 曹净, 孔程, 李松坡. 腐殖酸对泥炭土强度的影响及其机理分析[J]. 安全与环境学报, 2022, 22(5): 2493-2499.
- CAO J, KONG C, LI S P. Effect of humic acid on strength of peat soil and its mechanism analysis [J]. Journal of Safety and Environment, 2022, 22(5): 2493-2499. (in Chinese)
- [30] WONG L S, HASHIM R, ALI F H. A review on hydraulic conductivity and compressibility of peat [J]. Journal of Applied Sciences, 2009, 9(18): 3207-3218.
- [31] 王军, 崔志鹏, 严刚, 等. 考虑应力历史及密实状态的漫滩相软土剪切强度研究[J]. 工程勘察, 2023, 51(7): 13-19.
- WANG J, CUI Z P, YAN G, et al. Study on shear strength of flood plain soft soil considering stress history and density [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2023, 51(7): 13-19. (in Chinese)

(编辑 朱备)