

有机质含量及组分对泥炭土物理力学性质影响

裴利华, 杨醒宇, 桂跃, 王兆昌, 张毅

Influence of organic matter content and ingredient on the physical and mechanical properties of peat soils

PEI Lihua, YANG Xingyu, GUI Yue, WANG Zhaochang, and ZHANG Yi

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202106009>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

含石量对软质岩土石混合料土力学特性影响研究

A study of the effect of rock content on mechanical properties of soil-soft rock mixture

邵忠瑞, 罗雪贵, 郭娜娜 水文地质工程地质. 2019, 46(1): 111-111

冷端温度及解冻条件对原状海相软土冻融前后物理特性影响研究

A study of the influences of freezing temperature and thawing conditions on physical properties of marine soft soil before and after freezing-thawing

杨平, 刁鹏程, 张婷, 杨国清 水文地质工程地质. 2021, 48(1): 96-104

各向异性对软土力学特性影响的离散元模拟

Discrete element simulation of the influence of anisotropy on the mechanical properties of soft soil

赵洲, 宋晶, 刘锐鸿, 杨守颖, 李志杰 水文地质工程地质. 2021, 48(2): 70-77

江北机场高填方夯后碎块石土剪切力学性质研究

A study of the shear mechanical properties of high-filled gravel-block soil after dynamic compaction near the Jiangbei airport

马昊, 黄达, 肖衡林, 王俊杰, 马文浩 水文地质工程地质. 2019, 46(3): 88-88

某铁路隧道底鼓段粉砂质泥岩微宏观物理力学特性研究

A study of the micro-macro-physical and mechanical properties of silty mudstone in the bottom drum section of a railway tunnel

刘超, 袁伟, 路军富, 张钊 水文地质工程地质. 2020, 47(5): 108-115

固化轻质土在干湿循环及大变形条件下力学特性研究

A study of the mechanical properties of curing light soil under the condition of drying-wetting circles and large deformation

杨爱武, 姜帅, 封安坤, 陈立杰, 赵梦生 水文地质工程地质. 2020, 47(3): 93-100



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202106009

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 Lihua, YANG Xingyu, GUI Yue, *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.

有机质含量及组分对泥炭土物理力学性质影响

裴利华^{1,2}, 杨醒宇¹, 桂跃², 王兆昌^{2,3}, 张毅²

(1. 中铁四院集团西南勘察设计有限公司, 云南 昆明 650504; 2. 昆明理工大学建筑工程学院, 云南 昆明 650051; 3. 云南永筑建设勘察设计有限公司, 云南 保山 678000)

摘要: 富含有机物质是泥炭土工程性质不良的主要原因。不同有机质含量及组分的泥炭土, 其物理力学性质差异很大。为明确有机质含量的影响, 对数十组不同有机质含量无定形泥炭土试样进行一系列室内试验, 系统分析了物理、变形、强度及渗透性随有机质含量的变化规律; 为比较有机质组分不同导致的工程性质差异, 将以上无定形泥炭土物理力学指标与纤维泥炭土试验数据进行系统分析。结果表明: 无定形泥炭土基本物理力学指标与有机质含量间有一定的线性关系, 其中, 初始孔隙比(e_0)、天然含水率(w_0)、液塑限(w_L 、 w_p)、黏聚力(c)随有机质含量增加线性增大, 比重(G_s)、固结系数(C_v)和内摩擦角(φ)随有机质含量增大而减小。相较无定形泥炭土, 纤维泥炭土比重小、含水率大、孔隙比大。抗剪强度方面, 无定形泥炭土黏聚力随有机质含量增大而增大, 较纤维泥炭土略高; 内摩擦角随有机质含量增大而有下降趋势, 约为纤维泥炭土的 1/5 ~ 1/14。渗透性方面, 无定形泥炭土的初始渗透系数(k_{v0})及渗透指数(C_k)随有机质含量增大而减小, 且普遍小于纤维泥炭土。

关键词: 无定形泥炭土; 纤维泥炭土; 有机质含量; 物理力学性质

中图分类号: TU411.2

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2022)02-0077-09

Influence of organic matter content and ingredient on the physical and mechanical properties of peat soils

PEI Lihua^{1,2}, YANG Xingyu¹, GUI Yue², WANG Zhaochang^{2,3}, ZHANG Yi²

(1. Southwest Survey and Design Co. Ltd. of China Railway Fourth Institute Group, Kunming, Yunnan 650504, China; 2. Faculty of Civil Engineering and Mechanics, Kunming University of Science and Technology, Kunming, Yunnan 650051, China; 3. Yunnan Yongzhu Construction Survey and Design Co. Ltd., Baoshan, Yunnan 678000, China)

Abstract: Peat soil is rich in organic matter, which is the main reason for its poor engineering properties. The content and compositions of organic matter of peat soil lead to the various physical and mechanical properties of this kind of soil. In order to clarify the influence of organic matter content, a series of laboratory tests are conducted on dozens of groups of amorphous peat soil samples with different organic matter content, and the laws of physics, deformation, strength and permeability with organic matter content are systematically analyzed. In

收稿日期: 2021-06-03; 修订日期: 2021-09-26

投稿网址: www.swdzgcdz.com

基金项目: 国家自然科学基金项目(51768027; 52068039); 云南省科技厅重点研发计划课题(2018BC013)

第一作者: 裴利华(1980-), 男, 硕士, 教授级高工, 主要研究方向为岩土工程及技术。E-mail: 51205627@qq.com

通讯作者: 桂跃(1982-), 男, 博士, 教授, 硕士生导师, 主要从事软黏土力学及基坑、边坡、地下工程等教学与科研工作。

E-mail: gydrgui@kmust.edu.cn

order to compare the difference in engineering properties caused by the different organic matter components, the experimental data of the fiber peat soil from domestic and foreign literatures are collected and compared systematically with the physical and mechanical indexes of the amorphous peat soil. The results show that there is a certain linear relationship between the basic physical and mechanical indexes of the amorphous peat soil and the organic matter content. Among them, the initial void ratio (e_0), natural moisture content (w_0), liquid plastic limit (w_p, w_L), cohesion (c) increases linearly with the increase of the organic matter content. Specific gravity (G_s), consolidation coefficient (C_v) and internal friction angle (φ) decrease with the increase in organic matter content. Compared with the amorphous peat soil, the fiber peat soil is characterized by small specific gravity, high water content and a large void ratio. In terms of shear strength, the cohesive force of the amorphous peat increases with the increase of organic matter content, which is slightly higher than that of the fiber peat soil. The internal friction angle has a downward trend with the increase of organic matter content, which is about 1/5 ~ 1/14 that of the fiber peat soil. In terms of permeability, the initial permeability coefficient (k_{v0}) and permeability index (C_k) of the amorphous peat soil decrease with the increase in organic matter content, and are generally smaller than those of the fiber peat soil.

Keywords: amorphous peat soil; fibrous peat soil; organic matter content; physical and mechanical properties

泥炭土是自然界有机质最丰富的土类,有机质可占到干土总质量的 10% ~ 80%,甚至高达 98%^[1]。其有机质主要来源于植物枝叶、根系、分泌物及动物残骸的分解残余^[2]。通常将低分解度泥炭土称为纤维泥炭土,高分解度泥炭土称为无定形泥炭土。分解度不同的泥炭土,即使有机质含量相近,其工程性质也有很大的差异。

泥炭土特殊的工程性质主要受有机质含量及其组分的影响,相关研究成果比较丰富。Edil 等^[3]对大量纤维泥炭土数据进行统计分析,分析了有机质含量与抗剪强度的关系。吕岩等^[4]对吉林地区有机质含量 30% ~ 80% 草炭土(纤维泥炭土为主)压缩特性和强度特性所产生的力学效应机理进行了分析。Huat 等^[5]对来自马来西亚不同地区的纤维泥炭土的数据进行统计分析,结果发现:随着有机质含量增加,含水率、液限、压缩指数和孔隙比增加,比重减小。Skempton 等^[6]对 Avonmouth 地区的纤维泥炭土进行了研究,发现泥炭土的比重、液限和含水率与有机质含量密切相关。目前,关于有机质含量对泥炭土工程性质影响研究多针对纤维泥炭土,而对无定形泥炭土的研究则相对较少且不系统^[7-8]。

无定形泥炭土在斯里兰卡、印度尼西亚、马来西亚等多个国家广泛分布,我国西南及南方地区也较为常见。昆明、大理等城市下伏深厚泥炭土,随着基础建设力度加大,遇到泥炭土等软土软基问题日益频繁。但在泥炭土工程性质及相关工程问题的研究上,

目前还存在一些亟待解决的问题,包括(1)对无定形泥炭土,特别是其土中有机质含量与物理力学指标的关系还缺乏系统的了解。(2)纤维泥炭土和无定形泥炭土是工程中最常见的两类泥炭土,有些场地还出现两者共存的情况,由于缺乏对二者间差异的比较,常混为一谈。(3)二者物理力学性质的差异源于土中有机质组分的不同,由此导致的工程性质差异也需要进行系统的对比分析,但相关工作目前还未见报道。鉴于此,本文系统研究了数十组不同有机质含量无定形泥炭土试样的基本物理力学特性,分析有机质含量与各物理力学指标的关系,并通过广泛收集国内外关于纤维泥炭土研究数据,与本文试验结果进行对比分析,以期阐明有机质组分差异对泥炭土工程性质的影响。

1 材料及方法

1.1 土样制备

开展有机质对泥炭土工程性质的影响研究需要制备不同有机质含量的试样。目前常用方法主要有以下几种:第一是向纯净矿质土(蒙脱石、伊利石和高岭土)中添加有机化合物,形成有机质含量不同的有机黏土化合物,这是有机黏土化学中的常用手段,典型的如 Olgun 等^[9]和 Zeng 等^[10]进行的研究。但这种方法中的矿质土、有机化合物都与天然土体差异较大。第二是向有机质土中加入强氧化剂(如过氧化氢)去除土中有机质,再将除去有机质的土加入到天然土中,以调节有机质含量,如 Rashid 等^[11]、Booth 等^[12]

进行的研究。该方法有效保证土中矿质、有机质与天然土体基本进行的研究一致,但操作较为复杂,仅适用于有机质微量的土样,对泥炭土的指导意义不强。三是收集有机质含量不同的天然土体进行对比研究,吕岩等^[4]、牟春梅等^[13]、Odell等^[14]、Busch等^[15]、Bennett等^[16]等采取该研究方法,其缺点是由于土样成分的随机性及变异性,无法保证土样的物质成分完全相同,优点是土中矿物质和有机质均为自然形成,研究成果有助于明确区域性特殊土的工程性质,有较强的工程实用价值。综合比较以上方法,本文采用有机质含量不同的天然土体为对象开展研究(图1)。



图1 泥炭土土样
Fig. 1 Peat soil samples

本文泥炭土取自于滇西地区施甸盆地施甸县城区中部的5个钻孔,取土采用薄壁取土器,取土深度为5.0~11.5 m,属第四系湖沼相(Q₄^h)。分别采用灼烧法(ASTM D2974-87^[17])和湿筛法(ASTM D1997-91^[18])测试其有机质含量和残余纤维含量。结果表明,其有机质含量在10%~58%范围内,残余纤维含量均小于5%,按ASTM该土属于无定形泥炭土。

1.2 测试方法

选取数十组不同有机质含量的典型土样,系统地对其物理力学性质进行测试。测试指标包括天然含水率、重度、颗粒比重、界限含水率、一维固结系数、抗剪强度参数以及渗透系数等。由于泥炭土的特殊性,部分试验采用了和非有机质软土不同的试验条件及方法,天然含水率参考ASTM(D2974-87)^[17],土体的比重和界限含水率参考JTG E40-2007《公路土工试验规程》^[19]。

由于泥炭土的特殊性,目前为止,尚未针对泥炭土提出特定的剪切试验方法来确定其抗剪强度参数,但有学者认为环形剪切试验和直接剪切试验更适合^[20]。因此本文采用直接剪切试验。渗透试验包括泥炭土的变水头试验和一维渗压试验。变水头试验采用常

规的南京TST-55型渗透仪,渗压试验采用改装的联合一维固结仪-变水头试验装置,设备改装及具体试验方法详见文献[21]。

2 试验结果分析与探讨

2.1 泥炭土物理力学指标特征分析

基于以上试验,得到施甸无定形泥炭土物理力学性质指标如表1所示。由表1中可以看出,其具有天然含水率高、颗粒比重小、孔隙比大、压缩性高、抗剪强度低的工程特性,含水率、孔隙比、黏聚力及内摩擦角等指标和蒋忠信^[22]报道的昆明滇池泥炭土接近,滇池泥炭土多数也属于无定型泥炭土,表明二者的试验结果有一定的共性。

表1 施甸泥炭土基本物理力学指标
Table 1 Basic physical and mechanical indexes of the Shidian peat soil

指标参数	样本数	最小值	最大值	平均值
天然含水率 $w_0/\%$	38	59.3	221.5	132.8
颗粒比重 G_s	38	1.9	2.6	2.3
天然孔隙比 e_0	38	1.6	3.9	1.6
饱和度 $S_r/\%$	38	80.7	98.2	93.8
液限 $w_L/\%$	38	75.7	307.9	192.3
塑限 $w_p/\%$	38	26.3	210.0	101.4
有机质含量 $w_o/\%$	38	10.4	58.0	25.3
固结系数 $C_v/(10^{-4}\text{cm}^2\cdot\text{s}^{-1})$	38	1.1	8.3	4.0
黏聚力 c/kPa	38	5.3	15.9	10.9
内摩擦角 $\varphi/^\circ$	38	1.1	4.8	2.8
渗透系数 $k_{v0}/(\text{cm}\cdot\text{s}^{-1})$	38	2.1×10^{-9}	1.3×10^{-6}	5.4×10^{-7}

泥炭土工程性质与有机质分解程度直接相关,不同有机质组分的泥炭土,即使有机质含量相近,其工程性质也有很大的差异^[5,23-24]。广泛收集国内外权威文献中纤维泥炭土的测试结果,如表2所示,其中,Von Post值为根据Von Post法^[25]对泥炭土进行的分类,该方法根据有机质的分解程度,将泥炭土划分为H1~H10共10组分类,数值越大,土中有机质的分解度越高。综合分析无定形泥炭土和纤维泥炭土的物理力学指标数据,可以直观得出二者物理指标差异很大,纤维泥炭土具有更高的含水率、初始孔隙比,渗透性更显著。

图2是两类泥炭土的扫描电镜照片。微观结构上,无定形泥炭土中腐殖质吸附包裹在矿质土颗粒表面、填充在颗粒间的孔隙中,孔隙较小且分布均匀;而纤维泥炭土残余纤维随机分布,形成“架空结构”,孔隙大小不一、连通性更好。

表 2 泥炭土物理力学指标统计表

Table 2 Physical and mechanical indexes of the peat soil

泥炭土产地	Von Post值	有机质含量 $w_o/\%$	纤维含量 $w_f/\%$	颗粒比重 G_s	含水率 $w_0/\%$	孔隙比 e_0	液限 $w_L/\%$	塑限 $w_p/\%$	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$	渗透系数 $k_{v0}/(\text{cm}\cdot\text{s}^{-1})$	固结系数 $C_v/(10^{-4}\text{cm}^2\cdot\text{s}^{-1})$	来源
施甸	H8 ~ H10	10 ~ 58	<5	1.90 ~ 2.60	59.3 ~ 221.5	1.6 ~ 3.9	75.7 ~ 307.9	26.3 ~ 210.0	5.3 ~ 15.9	1.1 ~ 4.8	$0.8 \times 10^{-7} \sim 3.5 \times 10^{-7}$	0.9 ~ 2.6	本文
Nine springs	H2 ~ H3	74 ~ 84	75 ~ 92	—	562 ~ 655	—	—	—	—	30.0 ~ 64.3	—	—	—
Richfied	H3	25 ~ 31	37 ~ 45	—	153 ~ 181	—	—	—	—	38.1 ~ 58.3	—	—	Edil et al ^[3]
Hoyt Lakes	H4 ~ H5	3 ~ 70	50 ~ 58	—	—	—	—	—	—	36.8 ~ 56.7	—	—	—
吉林	H4 ~ H6	27 ~ 88	65 ~ 50	1.50 ~ 2.10	100 ~ 510	2.2 ~ 10.8	27.5 ~ 87.5	—	4.9 ~ 7.0	25.8 ~ 27.7	$1 \times 10^{-9} \sim 1 \times 10^{-2}$	9.9 ~ 24.5	吕岩等 ^[4]
Malaysia	H2 ~ H4	10 ~ 95	—	1.10 ~ 2.60	167.5 ~ 672.5	1.0 ~ 8.1	173.7 ~ 361.2	—	—	—	—	—	Huat et al ^[5]
Banting	H2 ~ H5	70 ~ 88	—	1.42 ~ 2.6	181 ~ 350	4.1 ~ 10.5	285.0 ~ 330.0	—	6.2 ~ 12	26.5 ~ 34.3	—	—	Huat et al ^[5]
Ackc	H5	1.4 ~ 98	—	1.46 ~ 2.67	560 ~ 890	—	—	—	—	—	—	—	Skempton et al ^[6]
滇池	H7 ~ H10	22.94 ~ 32.44	—	1.84 ~ 2.55	103.8 ~ 306.7	—	—	—	11.6 ~ 22.2	2.2 ~ 17.2	$4.9 \times 10^{-7} \sim 1.0 \times 10^{-3}$	—	蒋忠信 ^[22]
Ohmiv	H3 ~ H4	30 ~ 80	—	1.60 ~ 2.30	330 ~ 1 200	7.0 ~ 18.0	100.0 ~ 505.0	56.7 ~ 368.0	—	—	—	—	Yamaguchi ^[24]
James bay	H3 ~ H4	96	—	1.50 ~ 1.64	1 000 ~ 1 340	18.0 ~ 23.5	—	—	—	—	$1.3 \times 10^{-9} \sim 1.0 \times 10^{-2}$	—	Mesri et al ^[26]
Middieton	H3 ~ H4	90 ~ 95	—	1.53 ~ 1.65	510 ~ 850	8.3 ~ 14.2	—	—	—	—	$10^{-10} \sim 10^{-5}$	—	—
Turkey AC	H3 ~ H4	22.3 ~ 71.7	—	1.63 ~ 2.14	118.3 ~ 211.7	3.2 ~ 4.7	310.2 ~ 320	—	1.7	16.2	—	2.4 ~ 6.2	Ulusay ^[27]
Turkey SK	H5 ~ H7	55 ~ 58	—	1.66 ~ 2.44	105.0 ~ 559.0	2.7 ~ 3.3	147.5 ~ 317.2	—	1.6	16.2	—	1.7 ~ 22.5	—
Urmia	H3 ~ H6	25 ~ 77	—	1.63 ~ 2.35	102 ~ 671	2.4 ~ 11.2	—	—	—	—	$1.3 \times 10^{-8} \sim 1.6 \times 10^{-6}$	0.3 ~ 253.7	Badv et al ^[28]
Middleton, etc	H2 ~ H3	9.9 ~ 95	20 ~ 60.4	1.54 ~ 2.56	—	2.6 ~ 19.8	—	—	—	—	—	—	—
Cranberry Bogsnitt	H2 ~ H4	60 ~ 77	40 ~ 52	1.48 ~ 1.52	759 ~ 946	—	580.0 ~ 600.0	375 ~ 400	—	—	$3.1 \times 10^{-5} \sim 2.9 \times 10^{-5}$	2.5 ~ 1 503	Elsayed et al ^[29]
Bogs	H2 ~ H4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	$1.0 \times 10^{-7} \sim 4.0 \times 10^{-4}$	—	Hanrahan ^[30]
Muskeg	H3 ~ H4	84.2 ~ 95.4	—	1.41 ~ 1.7	605 ~ 1 290	10.3 ~ 17.5	—	—	—	—	1.0×10^{-4}	—	Samson ^[31]
Matagam	H2 ~ H4	68 ~ 99.3	40 ~ 80	—	660 ~ 1 591	—	—	—	—	—	$5.0 \times 10^{-5} \sim 5.0 \times 10^{-3}$	—	Lefebvre ^[32]
Middleton	H3	—	—	—	610 ~ 850	—	—	—	—	—	$6.0 \times 10^{-6} \sim 5.0 \times 10^{-5}$	—	Mesri ^[33]
Wisconsin	H1 ~ H3	—	20 ~ 64	1.41 ~ 1.94	240 ~ 600	—	—	—	—	—	$2.0 \times 10^{-8} \sim 5.0 \times 10^{-5}$	—	Dhowian ^[34]
Surfers Paradise	H2 ~ H3	63 ~ 68	—	1.57	168 ~ 247	—	259.0 ~ 305.0	125 ~ 207	—	—	$2.4 \times 10^{-5} \sim 1.4 \times 10^{-3}$	3.6 ~ 128.4	Al-Ani ^[35]
Banyuasin regency and Sumatra	H1 ~ H4	>80	>20	1.39 ~ 1.90	200 ~ 700	3.0 ~ 15.0	—	—	—	—	$1.9 \times 10^{-4} \sim 4.9 \times 10^{-4}$	9.8 ~ 57.4	Sutejo et al ^[36]
Klang	H4	88.6 ~ 99.1	90.25 ~ 90.49	1.23 ~ 1.48	572.9 ~ 690.9	8.0 ~ 9.6	—	—	—	—	6.3×10^{-4}	38.1 ~ 164.9	Ali ^[37]
Thompson	H2 ~ H5	—	—	—	612 ~ 1 161	—	—	—	—	—	8.0×10^{-5}	—	Earl ^[38]
Minnesota	H2 ~ H3	—	87.3	—	—	—	—	—	—	—	$>18.0 \times 10^{-4}$	—	Boelter ^[39]

2.2 有机质含量及组分对泥炭土物理指标影响分析

2.2.1 比重(G_s)

图 3 为颗粒比重与有机质含量关系曲线。可以看出,无定形泥炭土的比重随有机质含量增加线性减小,而纤维泥炭土的比重随有机质含量增加更接近呈指数函数关系减小。相同有机质含量下,无定形泥炭土的比重略大于纤维泥炭土。

2.2.2 天然含水率(w_0)和孔隙比(e_0)

泥炭土天然含水率、初始孔隙比随有机质含量变化规律分别如图 4、图 5 所示。由图 4 中可以看出,无定形泥炭土的含水率与有机质含量大致呈线性关系,而纤维泥炭土的含水率与有机质含量为指数函数关系。当有机质含量较低时,2 种泥炭土的含水率接近,随着有机质含量增加,纤维泥炭土含水率逐渐高于无定

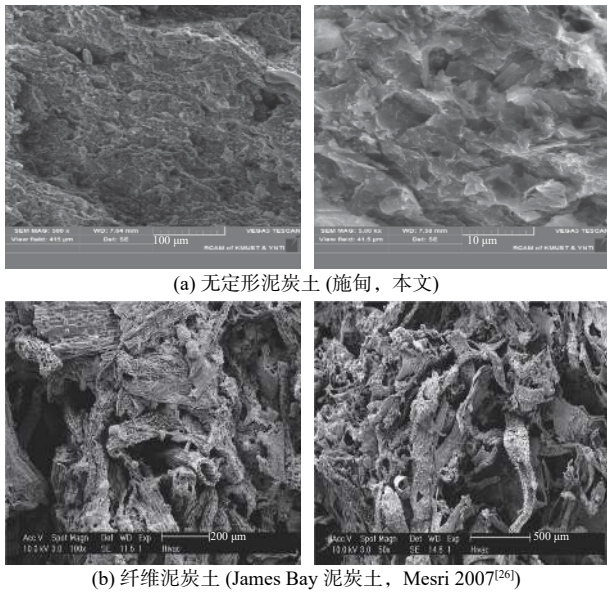


图 2 无定形泥炭土和纤维泥炭土扫描电镜照片

Fig. 2 Scanning electron microscope of the amorphous peat soil and fiber peat soil

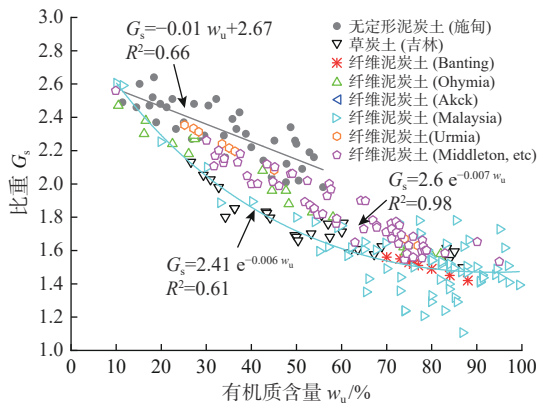


图 3 泥炭土比重与有机质含量的关系

Fig. 3 Relationship between the specific gravity and content of organic matter of the peat soil

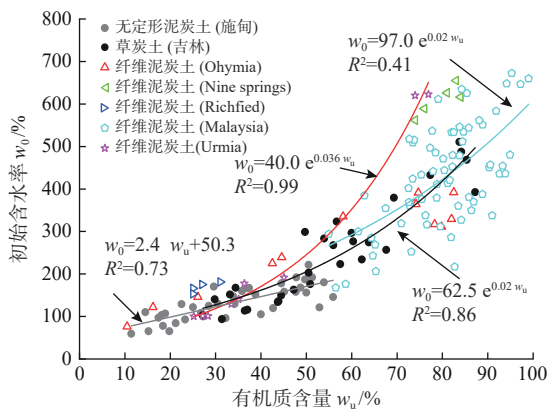


图 4 泥炭土初始含水率与有机质含量的关系

Fig. 4 Relationship between the initial moisture content and organic matter content of the peat soil

形泥炭土, 蒋忠信^[22]对滇池泥炭土进行研究也得到了类似的结论。从图 5 中可以看出, 2 种泥炭土的初始孔隙比与有机质含量关系表现出与初始含水率-有机质含量基本一致的变化规律。

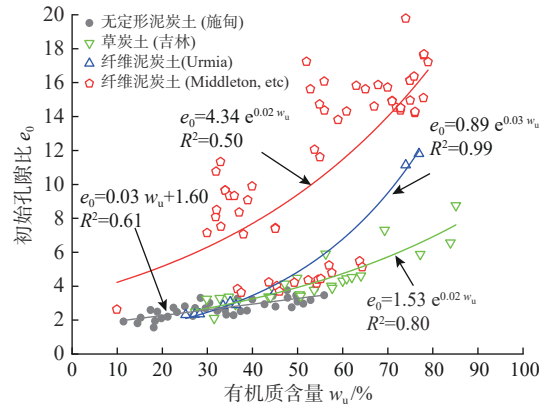


图 5 泥炭土初始孔隙比与有机质含量的关系

Fig. 5 Relationship between the void ratio and organic matter content of the peat soil

无定形泥炭土中腐殖质的强吸水性是引起土体含水率随有机质含量增加的主要原因。腐殖质是由多酚和多醌类物质聚合而成的非晶形高分子有机化合物, 具有巨大的比表面积和亲水基团, 单位重量腐殖质的持水量是硅酸盐黏土矿物的 4~5 倍, 最大吸水量可以超过其本身重量的 500%^[40]。当有机质含量较低时, 土中以矿质颗粒为主, 腐殖质或残余纤维对土体的含水率、孔隙比的影响无太大差异。随着有机质含量增加, 纤维泥炭土中的残余纤维含量越高, “架空结构”所形成的孔隙大小和数量都远大于腐殖质中疏松海绵状结构的土体孔隙, 因此纤维泥炭土含水率、孔隙比在有机质含量较高时大幅度增加。

2.2.3 界限含水率(w_L 、 w_p)

泥炭土界限含水率随有机质含量的变化规律如图 6 所示。由图 6 中可以看出, 无定形泥炭土的液塑限与有机质含量呈线性关系。纤维泥炭土中由于残余纤维丰富, 在很大程度上影响了土体液塑限的准确测定。一些学者认为, 纤维泥炭土液塑限的可用数据很少^[27]。从图 6 中零星的数据来看, 纤维泥炭土的液塑限也大致随有机质含量增加而增大, 但相关性较差。

2.3 有机质含量及组分对泥炭土力学指标影响分析

2.3.1 固结系数(C_v)

从图 7 可以看出, 无定形泥炭土的固结系数远小于纤维泥炭土。无定形泥炭土固结系数随有机质含量增加有下降趋势, 但相关性不显著。吉林草炭土^[4]

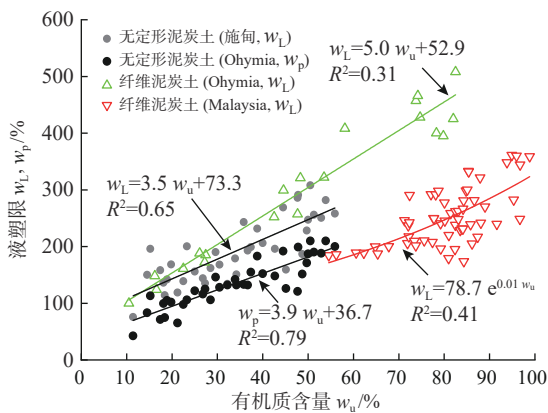


图 6 泥炭土液塑限与有机质含量的关系

Fig. 6 Relationship between the liquid limit and organic matter content of the peat soil

固结系数与有机质含量呈现显著的负相关性，而 Urmia 纤维泥炭土^[27]固结系数和有机质含量之间却无明显相关性，进一步说明纤维泥炭土结构分布的杂乱无序性。

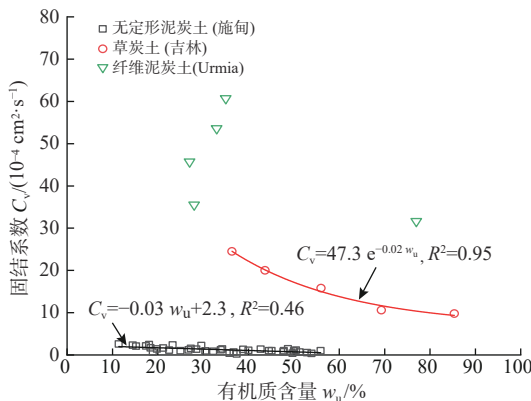


图 7 泥炭土固结系数随有机质含量变化规律

Fig. 7 Variation of the peat soil consolidation coefficient with organic matter content

2.3.2 黏聚力(c)与内摩擦角(φ)

泥炭土黏聚力、内摩擦角随有机质含量的变化规律如图 8 所示。从图 8 中可以看出，泥炭土黏聚力随有机质含量增加线性增大，无定形泥炭土和纤维泥炭土有类似的规律，但在相同有机质含量下，无定形泥炭土的黏聚力高于纤维泥炭土。Badv 等^[28]对 2 种不同分解度的泥炭土进行研究也得到了类似的结论。同时，无定形泥炭土的内摩擦角远小于纤维泥炭土，无定形泥炭土的内摩擦角随有机质含量的增加线性减小，但纤维泥炭土的内摩擦角与有机质含量之间的关系却非常复杂。从前人研究结果来看，二者之间大部分呈现正相关，但也有少数是呈现负相关的。有些

纤维泥炭土有机质含量与内摩擦角之间呈现显著的相关性，而有些却很离散。在相同有机质含量下，纤维泥炭土的内摩擦角约为无定形泥炭土最大内摩擦角的 5~14 倍。综合分析图 8 可知，无定形泥炭土的抗剪强度以黏聚力为主，纤维泥炭土则以摩擦特性为主。这是因为无定形泥炭土的有机质以腐殖质为主，腐殖质一类组成和结构都十分复杂的天然高分子聚合物，以能基、范德华力、氢键、阳离子键等胶结作用与矿物土颗粒胶结在一起^[40]，该胶接作用有效提高了土体的黏聚力。另外，由于腐殖质为胶体形态，沉积过程中土颗粒间密实度相对纤维泥炭土大，土颗粒间水的表面张力、颗粒与颗粒间的接触面积都相对较大，有助于提高土体的黏聚力^[28,41]。胶体形态的腐殖质包裹在土粒表面，有效减少了剪切过程中土颗粒间的相互摩擦。

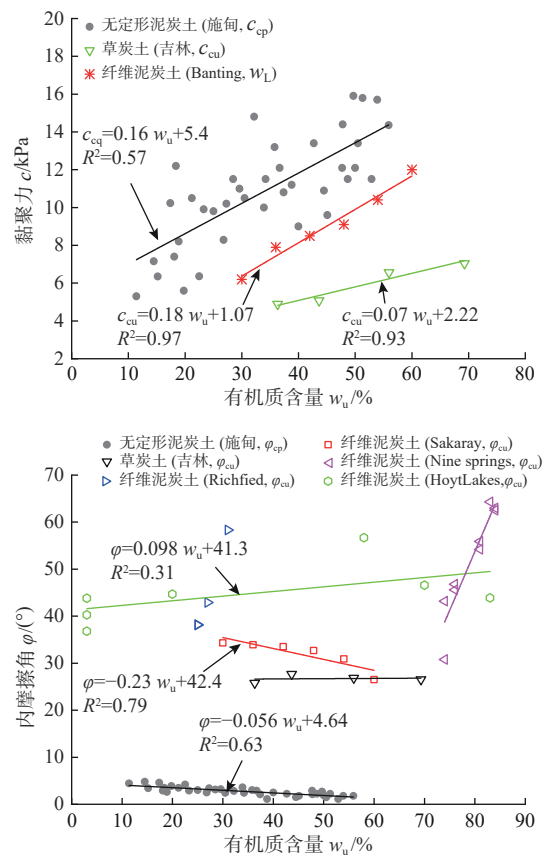


图 8 泥炭土黏聚力、内摩擦角随有机质含量变化规律

Fig. 8 Changes in the peat soil cohesion and internal friction angle with organic matter content

纤维泥炭土内摩擦角测试结果为何远高于一般软黏土是国内外学者关注的问题。比较一致的观点是，由于纤维泥炭土中大量未完全分解的植物纤维纵

横交错分布于土颗粒间,在剪切过程中,植物纤维起到类似“加筋”的作用,剪切面上的纤维与纤维间形成“互锁”结构,有效提高了土体的内摩擦角^[3,28,42]。根据本文统计结果,高分解泥炭土内摩擦角在 $1.0^{\circ} \sim 5.0^{\circ}$,而纤维泥炭土内摩擦角高达 $25^{\circ} \sim 70^{\circ}$,Long等^[20]、Mesri等^[26]、Yamaguchi等^[43]通过三轴试验所测得的纤维泥炭土有效内摩擦角(φ')也高达 $48^{\circ} \sim 68^{\circ}$ 。由于土工试验试样的尺寸较小,放大了残余纤维的“加筋”效果,显然,将常规土工试验得出的抗剪强度参数直接用于工程设计需要谨慎。

2.4 有机质含量及组分对泥炭土渗透特性的影响

从表2中可以直观看出,无定形泥炭土的渗透性小于纤维泥炭土,甚至相差几个数量级,这和它们各自的结构特性及孔隙特征有关。但泥炭土的渗透系数与有机质含量之间关系的研究还比较鲜见。

从图9可以看出,无定形泥炭土的初始渗透系数随着有机质含量增大有减小的趋势,而结合图5可知,随着有机质含量的增大,土的初始孔隙比 e_0 是在增大的,但初始渗透系数(k_{v0})并未随之增大,这似乎是不合常理的。这可能是由于虽然腐殖质属于多孔物质,但由于孔隙小且封闭,且腐殖质对水的吸附作用强,并不利于水的渗透。而纤维泥炭土中孔隙大、连通性好,渗透系数通常远高于无定形泥炭土。由于收集到的样本太少,纤维泥炭土渗透系数与有机质含量关系无法准确分析。

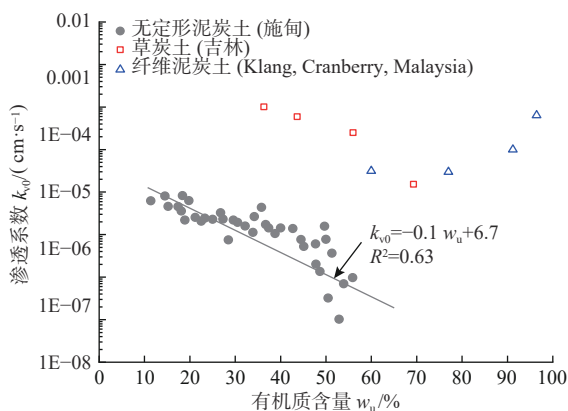


图9 泥炭土初始渗透系数随有机质含量变化规律

Fig. 9 Variation of the initial permeability coefficient of the peat soil with organic matter content

图10是3组不同有机质含量无定形泥炭土及几种纤维泥炭土在渗压过程中的孔隙比与渗透系数的关系对比。可以看出,在固结压缩过程中,泥炭土的渗透性都在下降,但下降程度不一。引入渗透指数

(C_k),其形式上和压缩指数(C_c)类似,可以表征土中孔隙减少导致其渗透性下降程度,是分析土体渗透特性的重要参数^[42]。Tavenas等发现 C_k 与土的 e_0 有关,当 e_0 在 $0.8 \sim 3.0$ 范围内可以用一个简单的线性关系 $C_k=0.5e_0$ 表示,该式被认为适用于大多数普通黏性土。Mesri等^[26]对某纤维泥炭土渗压试验结果进行了拟合分析,得出经验关系式 $C_k=0.25 e_0$ 。从图10中可知,纤维泥炭土的 C_k 大于无定形泥炭土,无定形泥炭土的 C_k 随有机质含量增大而减小。

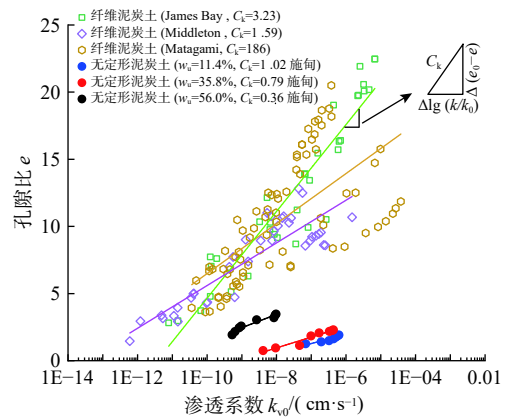


图10 泥炭土孔隙比与渗透系数关系

Fig. 10 Relationship between the porosity ratio and coefficient of permeability of the peat soil

3 结论

(1)无定形泥炭土的基本物理力学指标与有机质含量间有一定的线性关系。其中,初始孔隙比、天然含水率、液塑限、黏聚力随有机质含量增加线性增大,比重、固结系数和内摩擦角随有机质含量增大而减小。相较无定形泥炭土,纤维泥炭土比重小,含水率和孔隙比大。

(2)抗剪强度方面,无定形泥炭黏聚力随有机质含量增大而增大,较纤维泥炭土略高;内摩擦角随有机质含量增大而有下降趋势,约为纤维泥炭土的 $1/5 \sim 1/14$ 。胶体态腐殖质与矿物间的胶结作用和静电引力有效提高了土体的黏聚力,有机质含量增大,黏聚力升高;而腐殖质吸附在矿质土表面,使得其摩擦性降低,因此,无定形泥炭土的抗剪强度主要体现在黏聚力上,内摩擦角极低。而由于残余纤维的“加筋作用”,纤维泥炭土测得的摩擦角极高,约为无定形泥炭土的 $5 \sim 14$ 倍。

(3)渗透性方面,天然状态下,无定形泥炭土的初始渗透系数通常小于纤维泥炭土。渗压条件下,无定

形泥炭土的渗透指数随有机质含量增大而减小,且普遍小于纤维泥炭土。

参考文献 (References) :

- [1] 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.
- [2] HOBBS N B. Mire morphology and the properties and behaviour of some British and foreign peats[J]. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 1986, 19(1): 7 – 80.
- [3] EDIL T B, Wang X. Shear strength and K_0 of peats and organic soils[J]. *Geotechnics of High Water Content Materials*, 2000: 209 – 225.
- [4] 吕岩, 仝磊, 徐燕, 等. 有机质对草炭土物理力学性质影响的机理分析[J]. *岩土工程学报*, 2011, 33(4): 655 – 660. [LYU Yan, NIE Lei, XU Yan, et al. The mechanism of organic matter effect on physical and mechanical properties of turf soil[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2011, 33(4): 655 – 660. (in Chinese with English abstract)]
- [5] HUAT B B K, ASADI A, KAZEMIAN S. Experimental investigation on geomechanical properties of tropical organic soils and peat[J]. *American Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2009, 2(1): 184 – 188.
- [6] SKEMPTON A W, PETLEY D J. Ignition loss and other properties of peats and clays from avonmouth, King's Lynn and cranberry moss[J]. *Géotechnique*, 1970, 20(4): 343 – 356.
- [7] SANTAGATA M, BOBET A, JOHNSTON C T, et al. One-dimensional compression behavior of a soil with high organic matter content[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2008, 134(1): 1 – 13.
- [8] HUAT B B K, KAZEMIAN S, PRASAD A, et al. State of an art review of peat: General perspective[J]. *International Journal of Physical Sciences*, 2011, 6(8): 1988 – 1996.
- [9] OLGUN M, YILDIZ M. Effect of organic fluids on the geotechnical behavior of a highly plastic clayey soil[J]. *Applied Clay Science*, 2010, 48(4): 615 – 621.
- [10] ZENG L L, HONG Z S, WANG C, et al. Experimental study on physical properties of clays with organic matter soluble and insoluble in water[J]. *Applied Clay Science*, 2016, 132/133: 660 – 667.
- [11] RASHID M A, BROWN J D. Influence of marine organic compounds on the engineering properties of a remoulded sediment[J]. *Engineering Geology*, 1975, 9(2): 141 – 154.
- [12] BOOTH J S, DAHL A G. A note on the relationships between organic matter and some geotechnical properties of a marine sediment[J]. *Marine Geotechnology*, 1986, 6(3): 281 – 297.
- [13] 牟春梅, 李佰锋. 有机质含量对软土力学性质影响效应分析[J]. *水文地质工程地质*, 2008, 35(3): 42 – 46. [MU Chunmei, LI Baifeng. Influence of organic matter on mechanical character of soft soil[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2008, 35(3): 42 – 46. (in Chinese with English abstract)]
- [14] ODELL R T, THORNBURN T H, MCKENZIE L J. Relationships of atterberg limits to some other properties of Illinois soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1960, 24(4): 297 – 300.
- [15] WILLIAM H BUSCH, GEORGE H KEL. The physical properties of Peru-Chile continental margin sediments: the influence of coastal upwelling on sediment properties[J]. *SEPM Journal of Sedimentary Research*, 1981, 51(3): 705 – 719.
- [16] BENNETT R H, LEHMAN L, HULBERT M H, et al. Interrelationships of organic carbon and submarine sediment geotechnical properties[J]. *Marine Geotechnology*, 1985, 6(1): 61 – 98.
- [17] American Society for Testing and Materials. Standard test method for moisture, ash, and organic matter of peat and other organic soils: D 2974—87 [S]. West Conshohocken, PA, USA: American Society for Testing and Materials, 1989.
- [18] American Society for Testing and Materials. Standard test method for laboratory determination of the fiber content of peat samples by dry mass: D 1997—91[S]. West Conshohocken, PA, USA: American Society for Testing and Materials, 1991.
- [19] 中华人民共和国交通部. 公路土工试验规程: JTG E40—2007[S]. 北京: 人民交通出版社, 2007. [Ministry of Transport of the People's Republic of China. Test methods of soils for highway engineerin: JTG E40—2007[S]. Beijing: China Communications Press, 200. (in Chinese)]
- [20] LONG M. Review of peat strength, peat characterisation and constitutive modelling of peat with reference to landslides[J]. *Studia Geotechnica et Mechanica*, 2005, 27(3/4): 67 – 90.
- [21] 桂跃, 付坚, 吴承坤, 等. 高原湖相泥炭土渗透特性研究及机制分析[J]. *岩土力学*, 2016, 37(11): 3197 –

3207. [GUI Yue, FU Jian, WU Chengkun, et al. Hydraulic conductivity of lacustrine peaty soil in plateau areas and its mechanism analysis[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2016, 37(11): 3197 – 3207. (in Chinese with English abstract)]
- [22] 蒋忠信. 滇池泥炭土-地质·工程[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 1994. [JIANG Zhongxin. Dianchi peaty soil[M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 1994. (in Chinese)]
- [23] ZWANENBURG C. The influence of anisotropy on the consolidation behaviour of peat[J]. TU Delft: Delft University of Technology. 2005.
- [24] YAMAGUCHI H, OHIRA Y, KOGURE K. Volume change characteristics of undisturbed fibrous peat [J]. *Soils and Foundations*, 1985, 25(2): 119 – 134.
- [25] VON POST L. Sveriges geologiska undersoknings torvinventering och nogra av dess hittills vunna resultat[J]. Svenska Mosskulturforeningens Tidskrift, Jonkoping, Sweden, 1921, 36: 1 – 37.
- [26] MESRI G, AJLOUNI M. Engineering properties of fibrous peats[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2007, 133(7): 850 – 866.
- [27] ULUSAY R, TUNCA Y, HASANCEBI N. Geo-engineering properties and settlement of peaty soils at an industrial site (Turkey)[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2010, 69(3): 397 – 410.
- [28] BADV K, SAYADIAN T. An investigation into the geotechnical characteristics of Urmia peat[J]. *Iranian Journal of Science and Technology - Transactions of Civil Engineering*, 2012, 36(C2): 167 – 180.
- [29] ELSAYED A, PAIKOWSKY S, KURUP P. Characteristics and engineering properties of peaty soil underlying cranberry bogs[C]//Geo-Frontiers Congress 2011. March 13–16, 2011, Dallas, Texas, USA. Reston, VA, USA: American Society of Civil Engineers, 2011: 2812 – 2821.
- [30] HANRAHAN E T. An investigation of some physical properties of peat[J]. *Géotechnique*, 1954, 4(3): 108 – 123.
- [31] SAMSON L, ROCHELLE P L. Design and performance of an expressway constructed over peat by preloading[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1972, 9(4): 447 – 466.
- [32] LEFEBVRE G, LANGLOIS P, LUPIEN C, et al. Laboratory testing and in situ behaviour of peat as embankment foundation[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1984, 21(2): 322 – 337.
- [33] MESRI G, STARK T D, AJLOUNI M A, et al. Secondary compression of peat with or without surcharging[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 1997, 123(5): 411 – 421.
- [34] DHOWIAN A W, EDIL T B. Consolidation behavior of peats[J]. *Geotechnical Testing Journal*, 1980, 3(3): 105.
- [35] AL-ANI H, OH E, CHAI G. Engineering properties of peat in estuarine environment[C]//Foundation and Soft Ground Engineering. 2013.
- [36] SUTEJO Y, SAGGAFF A, RAHAYU W, et al. Hydraulic conductivity and compressibility characteristics of fibrous peat[J]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, 620: 012053.
- [37] ALI F H, SING W L, HASHIM R. Engineering properties of improved fibrous peat[J]. *Scientific Research & Essays*, 2010, 5(2).
- [38] DE GUZMAN E M B, ALFARO M C. Geotechnical properties of fibrous and amorphous peats for the construction of road embankments[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2018, 30(7): 04018149.
- [39] BOELTER D H. Physical properties of peats as related to degree of decomposition[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1969, 33(4): 606 – 609.
- [40] 黄昌勇. 土壤学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000. [HUANG Changyong. Soil science[M]. Beijing: Chinese Agriculture Press, 2000. (in Chinese)]
- [41] 张亚玲, 赵晓彦, 严群. 云母影响水泥软黏土强度的试验研究[J]. *水文地质工程地质*, 2021, 48(4): 101 – 108. [ZHANG Yaling, ZHAO Xiaoyan, YAN Qun. Experimental research on the influence of mica on strength of cement-reinforced soft clay[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2021, 48(4): 101 – 108. (in Chinese with English abstract)]
- [42] TAVENAS F, JEAN P, LEBLOND P, et al. The permeability of natural soft clays. Part II: Permeability characteristics[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1983, 20(4): 645 – 660.
- [43] YAMAGUCHI H, OHIRA Y, KOGURE K, et al. Undrained shear characteristics of normally consolidated peat under triaxial compression and extension conditions[J]. *Soils and Foundations*, 1985, 25(3): 1 – 18.