

## 季冻区草炭土固结特性研究

韩伶敏, 徐燕, 高康

### Consolidation characteristics of the turfy soil in seasonally frozen area

HAN Lingmin, XU Yan, and GAO Kang

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202109028>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 玄武岩纤维加筋黄土承载比试验研究

An experimental study of the California bearing ratio of basalt fiber reinforced loess

李沛达, 骆亚生, 陈箐芮, 汪国刚 水文地质工程地质. 2021, 48(1): 131-137

#### 超载预压处理软土的次固结特征及沉降计算

Secondary consolidation characteristics and settlement calculation of soft soil treated by overload preloading

陈立国, 吴昊天, 陈晓斌, 贺建清 水文地质工程地质. 2021, 48(1): 138-145

#### 高岭土电渗固结特性及数值模拟研究

A study of the kaolin electro-osmotic consolidation characteristics and their numerical simulation

沈美兰, 周太全, 李吴刚 水文地质工程地质. 2021, 48(4): 78-85

#### 固结与荷载耦合作用下吹填土力学性质与微结构参数关联性

Correlation between mechanical properties and microstructure parameters of soft dredger fill under the coupling action of consolidation and load

杨爱武, 封安坤, 姜帅, 仲涛, 李潇雯 水文地质工程地质. 2019, 46(5): 96-105

#### 基于固结-固化复合技术对温州淤泥加固的试验研究

An experimental study of reinforcement of the Wenzhou sludge based on the consolidation and solidification composite technology

袁波, 邵吉成, 骆嘉成, 叶宏峰 水文地质工程地质. 2022, 49(1): 66-74

#### 无黏性土的压缩特性及模型

Compression characteristics and models of cohesionless soil

马露 水文地质工程地质. 2021, 48(4): 72-77



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202109028

韩伶敏, 徐燕, 高康. 季冻区草炭土固结特性研究 [J]. 水文地质工程地质, 2022, 49(4): 109-116.

HAN Lingmin, XU Yan, GAO Kang. Consolidation characteristics of the turfy soil in seasonally frozen area[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2022, 49(4): 109-116.

## 季冻区草炭土固结特性研究

韩伶敏, 徐 燕, 高 康

(吉林大学建设工程学院, 吉林 长春 130000)

**摘要:** 季冻区草炭土的工程性质很差, 具有高压缩性的同时蠕变特性明显, 路基工后沉降量大。目前针对季冻区草炭土固结压缩蠕变特性的研究仍相对匮乏, 亟需对其固结压缩及蠕变特性进行深入研究, 为季冻区草炭土路基的沉降预测提供参数依据。选取吉林省敦化市江源镇典型季冻区草炭土为研究对象, 通过一维固结压缩试验和一维固结蠕变试验, 获得草炭土压缩系数、固结系数和次固结系数分布范围及纤维含量对草炭土主、次固结特性的影响规律。试验表明: 分级加载下, 草炭土纤维含量越大, 压缩性越强, 两者呈正相关性; 固结系数( $C_v$ )范围为  $1.00 \times 10^{-3} \sim 8.39 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{s}$ , 固结系数随固结压力增大而减小, 当固结压力超过 200 kPa 之后基本稳定。次固结系数( $C_a$ )范围为 0.022 ~ 0.095, 次固结系数随固结压力增大而增大, 到达峰值后逐渐减小, 峰值时所对应的固结压力介于 50 ~ 100 kPa 之间; 当固结压力一定时, 纤维含量越大固结蠕变越明显, 次固结系数越大。吉林敦化草炭土的次固结系数和压缩指数具有一定的相关性, 纤维质量占比为 21%、34%、48%、59%、73% 的草炭土对应的次固结系数与压缩指数比值( $C_a/C_c$ )分别为 0.045 2, 0.033 1, 0.030 3, 0.024 6, 0.024 5。

**关键词:** 草炭土; 固结压缩; 固结蠕变; 纤维含量;  $C_a/C_c$

中图分类号: TU411.5

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2022)04-0109-08

## Consolidation characteristics of the turfy soil in seasonally frozen area

HAN Lingmin, XU Yan, GAO Kang

(College of Construction Engineering, Jilin University, Changchun, Jilin 130000, China)

**Abstract:** The turfy soil in seasonally frozen regions has very poor engineering properties, with high compressibility and obvious creep characteristics. The settlement of roadbed after construction is large. Therefore, it is urgent to conduct in-depth researches due to the lack of consolidation compression and creep characteristics researches of turfy soil in seasonally frozen regions, so as to provide parameters for the settlement prediction of the turfy soil roadbed in seasonally frozen regions. The typical turfy soil in seasonally frozen region near the Jiangyuan town of the city of Dunhua in Jilin Province is selected as the research object. Through 1D consolidation compression test and 1D consolidation creep test, the distribution range of the compression coefficient, consolidation coefficient and secondary consolidation coefficient of the turfy soil and the influence of fiber content on the primary and secondary consolidation characteristics of the turfy soil are obtained. The experimental results show that under graded loading, the greater the fiber content is, the stronger the compressibility of turfy soil is, showing a positive correlation. Consolidation coefficient ( $C_v$ ) ranges from

收稿日期: 2021-09-10; 修订日期: 2021-11-12

投稿网址: [www.swdzgdz.com](http://www.swdzgdz.com)

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(41702300); 国家自然科学基金项目(41572254)

第一作者: 韩伶敏(1996-), 男, 硕士研究生, 主要从事特殊土的工程地质性质研究。E-mail: [773939896@qq.com](mailto:773939896@qq.com)

$1.00 \times 10^{-3}$  to  $8.39 \times 10^{-3}$   $\text{cm}^2/\text{s}$ .  $C_v$  decreases with the increase of consolidation pressure. When the consolidation pressure exceeds 200 kPa,  $C_v$  is basically in a stable range. The secondary consolidation coefficient ( $C_\alpha$ ) ranges from 0.022 to 0.095.  $C_\alpha$  increases with the increasing consolidation pressure, then decreases gradually after reaching the peak value when the corresponding consolidation pressure varies between 50 kPa and 100 kPa. When the consolidation pressure is constant, the higher the fiber content is, the more obvious the consolidation creep is, and the higher  $C_\alpha$  is. There is a certain correlation between the secondary consolidation coefficient and compression index of the Dunhua turfy soil in Jilin Province. The  $C_\alpha/C_c$  numerical values corresponding to the turfy soil with the fiber content of 21%, 34%, 48%, 59% and 73% are 0.0452, 0.0331, 0.0303, 0.0246 and 0.0245, respectively.

**Keywords:** turfy soil; consolidation compression; consolidation creep; fiber content;  $C_\alpha/C_c$

草炭土是一种含有大量植物残体、腐殖质及部分矿物质的特殊土,在我国主要分布于大小兴安岭、长白山脉、青藏高原以及新疆大部分山区<sup>[1]</sup>。草炭土的工程性质很差,压缩性高且工后沉降明显,随着道路工程的发展建设,大量的工程项目不可避免地穿越草炭土地区,路基多出现沉陷、基底被挤压引起侧向隆起、滑动坍塌等破坏现象<sup>[2]</sup>。因此亟需开展草炭土固结特性研究,为草炭土路基沉降预测提供理论和参数依据。

国内外对含纤维及腐殖质有机质土固结特性的研究主要有以下 2 个方面:(1)在固结压缩研究方面,Whitlow<sup>[3]</sup>、Razali 等<sup>[4]</sup>研究得到泥炭土的高压缩性由高有机质含量和高纤维含量决定,并导致严重的沉降问题。Santaga 等<sup>[5]</sup>研究表明泥炭土的固结压缩特性受分解度的影响很大,分解度越低压缩性越高,这是由于高含量植物纤维导致较高的含水率和孔隙比。Johari 等<sup>[6]</sup>研究得出泥炭土中的纤维含量极大地影响着压缩变形特性,纤维含量越高,含水率、孔隙比和压缩指数越大,压缩性越高,沉降量越大。桂跃等<sup>[7]</sup>探讨了云南地区泥炭土不同影响因素对固结系数的影响及机制。吕岩等<sup>[8]</sup>研究了草炭土不同有机质含量下的压缩、强度特性。(2)在固结蠕变研究方面,MacFarlane<sup>[9]</sup>发现泥炭土次固结系数较大,次固结变形量最高可占总沉降的 60%。桂跃等<sup>[10]</sup>提出云南地区泥炭土次固结系数随着固结压力的增大,呈现先快速增大、到达峰值后逐步减小的规律,次固结系数峰值所对应的固结压力在 100~200 kPa 之间,泥炭土次固结系数与压缩指数比值( $C_\alpha/C_c$ )约为 0.052。王竞宇等<sup>[11]</sup>探究了不同埋深和扰动状态对大理泥炭土固结蠕变特性的影响。冯瑞玲等<sup>[12]</sup>以云南某高速公路泥炭土路段为依托,对不同有机质含量的泥炭土进行了基本性质试验和一维蠕变试验。李育红等<sup>[13]</sup>对昆明滇池地区湖相泥炭土开展了主、次固结系数研究。

以上对于含纤维及腐殖质有机质土固结特性的研究已取得了较多的成果,但对季冻区草炭土固结压缩蠕变特性的研究仍相对匮乏。因此本文选取吉林省敦化市江源镇典型季冻区草炭土为研究对象,开展一维固结压缩试验和一维固结蠕变试验,分析压缩系数、固结系数和次固结系数的分布范围及纤维含量对草炭土主、次固结特性的影响规律。

## 1 草炭土的基本性质

采用 ASTM D 2974—14<sup>[14]</sup> 中的方法测得吉林敦化草炭土样的有机质质量分数范围为 36.25%~81.35%,采用 ASTM D 1997—13<sup>[15]</sup> 中的方法测得草炭土样的纤维质量分数范围为 19.83%~73.78%,如表 1 所示。

表 1 吉林敦化草炭土不同深度有机质质量分数 ( $W_u$ ) 和纤维质量分数 ( $W_f$ )

Table 1 Organic matter content and fiber content of the turfy soil at different depths near Dunhua in Jilin

深度/m	$W_u/\%$	$W_f/\%$
0.0~1.0	53.28~81.35	40.99~73.78
1.0~2.0	36.25~65.81	30.83~49.12
2.0~2.4	38.37~55.25	19.83~37.65

根据 ASTM D 4427—13<sup>[16]</sup> 标准将纤维质土分为 3 类,  $W_f \geq 67\%$  为纤维土,  $33\% \leq W_f < 67\%$  为半纤维土,  $W_f < 33\%$  为高分解土。选取高分解度草炭土 ( $W_f=21\%$ )、半纤维草炭土 ( $W_f=34\%$ 、 $W_f=48\%$ 、 $W_f=59\%$ ) 以及纤维草炭土 ( $W_f=73\%$ ) 试样,进行 5 种纤维草炭土的固结试验。根据《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)<sup>[17]</sup>,测得吉林敦化草炭土试样基本物理指标如表 2 所示。

吉林敦化草炭土含水率与初始孔隙比随纤维含量的增大而增大。当  $W_u=79.43\%$  ( $W_f=73\%$ ) 时,含水率和初始孔隙比最大,分别为 416.83%、8.88。

表 2 吉林敦化草炭土样基本物理指标

Table 2 Basic physical indexes of the turfy soil samples near Dunhua in Jilin

深度/m	取样编号	密度 $\rho$ /(g·cm <sup>-3</sup> )	含水率 $w$ /%	比重 $G_s$	初始孔隙比 $e_0$	有机质质量分数 $W_u$ /%	纤维质量占比 $W_f$ /%
0.0~0.5	K1-1	0.99	416.83	1.31	8.88	79.43	73
0.5~1.0	K2-1	1.05	392.92	1.62	7.11	67.12	59
1.0~1.5	K3-1	1.09	306.08	1.68	5.33	65.81	48
1.5~2.0	K4-1	1.14	242.18	2.09	4.50	50.88	34
2.0~2.4	K5-1	1.17	198.27	1.96	2.91	39.10	21

表 3 为云南滇池<sup>[18]</sup>和云南大理<sup>[19]</sup>2 种土样的基本物理指标,可以看出,云南滇池土样<sup>[18]</sup>中有机质质量分数范围在 15.7%~69.3% 之间,有机质含量越大,含水率和初始孔隙比越大。 $W_u=69.3\%$  时,含水率和初始孔隙比最大,分别为 406.3% 和 6.4。而云南大理土<sup>[19]</sup>有机质含量与含水率没有明显规律。

表 3 云南滇池土样<sup>[18]</sup>和云南大理土样<sup>[19]</sup>基本物理指标

Table 3 Basic physical indexes of Yunnan Dianchi Lake soil samples and Yunnan Dali soil samples

土样名称	深度/m	取样编号	含水率 $w$ /%	比重 $G_s$	初始孔隙比 $e_0$	有机质质量分数 $W_u$ /%
滇池泥炭土	2.5~3.0	CT1-1	64.6	2.4	1.4	15.7
	7.5~8.0	CT2-1	203.4	2.1	4.4	48.1
	1.0~2.0	CT3-1	406.3	1.5	6.4	69.3
大理泥炭土	1	S1	171.7			41.8
	1	S6	162.1			32.1
	1	S7	118.0			34.8

敦化草炭土与云南滇池泥炭土的有机质含量范围比较接近,敦化草炭土更疏松多孔。云南大理泥炭土有机质质量分数范围在 32.1%~41.8% 之间,含水率范围在 118.0%~171.7% 之间,含水率较前 2 种土偏小。

## 2 草炭土一维固结试验方法

对吉林敦化 5 种纤维含量草炭土样分别进行一维固结压缩试验和固结蠕变试验,采用分级加载方式,具体试验方案见表 4。

试验采用南京土壤仪器厂有限公司生产的 WG 型三联单杠杆固结仪,固结压缩试验稳定标准为每级压力下固结 24 h 或 1 h 变形量不大于 0.01 mm,固结蠕变稳定标准为 24 h 变形量不大于 0.01 mm<sup>[17]</sup>。考虑到草炭土的实际工程多以路基等工程为主,因此最大荷载采用 400 kPa。

## 3 试验结果及分析

### 3.1 先期固结压力

由于草炭土埋深较浅,先期固结压力较小。为确定草炭土先期固结压力,固结压缩试验在常规初始固

表 4 试验方案

Table 4 Test schemes

试验名称	试验目的	$W_f$ /%	加荷序列/kPa	加荷比	历时/d
固结压缩试验	先期固结压力分析	21	2.4-3.9-6.3-12.5-25-50-100-200-400 (12.5 kPa 开始每级 1 d)	—	7
		34			
		48			
		59			
		73			
固结压缩试验	(1)压缩特性分析 (2)主固结特性分析	21	12.5-25-50-100-200-400 (每级 1 d)	1	6
		34			
		48			
		59			
		73			
固结蠕变试验	固结蠕变特性分析	21	12.5-25-50-100-200-400 (每级 7 d)	1	42
		34			
		48			
		59			
		73			

结压力 12.5 kPa 之前分级施加 2.4, 3.9, 6.3 kPa 的固结压力,稳定标准为试样 1 h 变形量不大于 0.01 mm。吉林敦化 5 种纤维含量草炭土试样的  $e-p$  和  $e-lgp$  曲线如图 1 所示。孔隙比  $e$  随固结压力的增加递减幅度变小。由于  $e-lgp$  曲线屈服阶段的直线趋势不易判断,最大曲率点不易确定,采用传统的 Cassgrande 方法来确定草炭土的先期固结压力存在一定困难。针对这一问题,Onitsuka 等<sup>[20]</sup>、Hong 等<sup>[21]</sup>、桂跃等<sup>[10]</sup>等采用了  $\ln(1+e)-lgp$  双对数法较好地获得了土的先期固结压力。因而采用该法获得 5 种纤维含量草炭土  $\ln(1+e)-lgp$  双对数曲线及先期固结压力  $p_c$ ,如图 2 所示。

纤维质量分数为 21%、34%、48%、59%、73% 草炭土样的先期固结压力分别为 32.2, 21.3, 15.1, 4.2, 3.8 kPa, 实际上覆土压力为 28.13, 21.86, 13.13, 3.13, 1.88 kPa, 与先期固结压力基本一致,为正常固结土。通过查阅相关的地质勘查报告,该地区并未发生过剥蚀搬运等地质变化,上层未施加过荷载,属正常固结土。

### 3.2 草炭土的压缩特性

压缩系数  $a_{1-2} < 0.1 \text{ MPa}^{-1}$  时为低压缩性土,  $0.1 \text{ MPa}^{-1}$

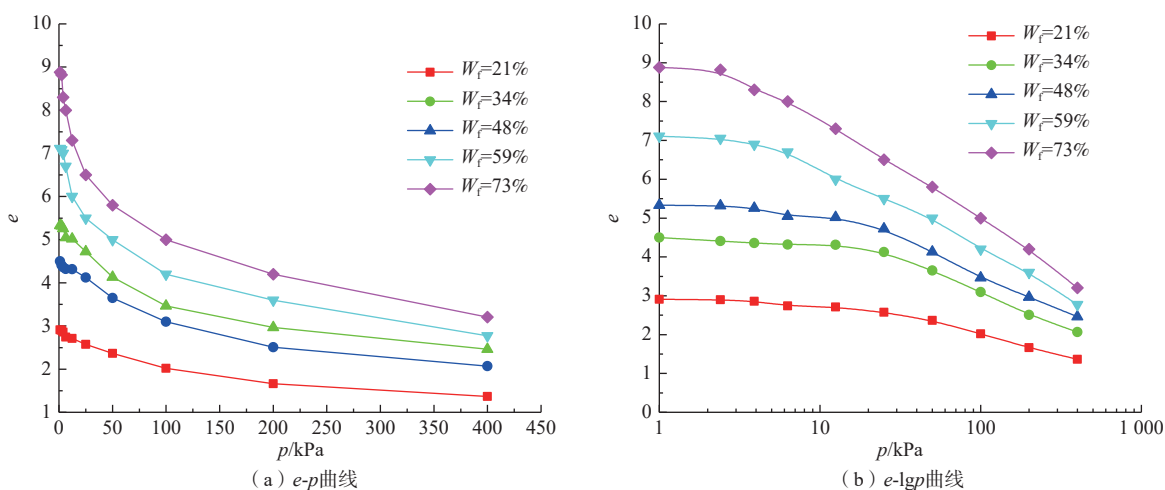


图 1 吉林敦化草炭土不同纤维含量的压缩曲线

Fig. 1 Compression curve of the Jilin Dunhua turf soil with different fiber contents

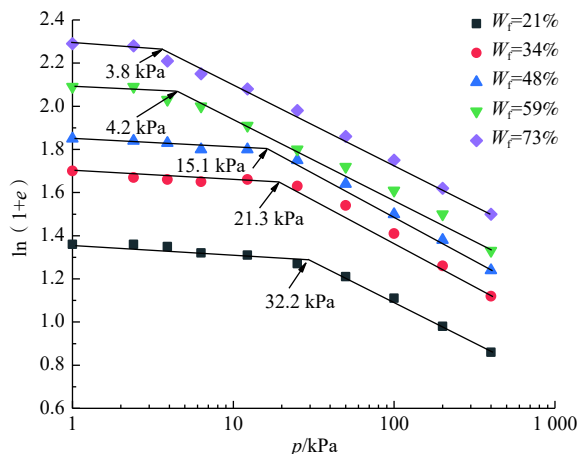


图 2 原状草炭土的  $\ln(1+e)$ - $\lg p$  曲线

Fig. 2  $\ln(1+e)$ - $\lg p$  curves of the undisturbed turf soil

$\leq a_{1-2} < 0.5 \text{ MPa}^{-1}$  时为中压缩性土,  $a_{1-2} \geq 0.5 \text{ MPa}^{-1}$  时为高压压缩性土<sup>[17]</sup>。图 3 为吉林敦化草炭土样和云南滇池泥炭土样的压缩系数( $a_v$ )和固结压力的关系曲线。吉林敦化草炭土样的压缩系数范围为  $1.49 \sim 51.74 \text{ MPa}^{-1}$ , 云南滇池泥炭土样<sup>[18]</sup> 压缩系数范围为  $0.71 \sim 52.71 \text{ MPa}^{-1}$ , 2 种土均属于高压压缩性土。

随着纤维含量的增加, 草炭土中絮状、多孔结构增多。固结压力一定时, 纤维含量越大, 压缩系数越大, 压缩性越强。

### 3.3 草炭土的主固结特性

采用时间对数法计算草炭土的固结系数  $C_v$ 。吉林敦化不同纤维含量草炭土和云南滇池泥炭土样<sup>[18]</sup> 的  $C_v$ - $p$  曲线如图 4 所示。

沈珠江<sup>[22]</sup> 经过研究总结出连云港淤泥质土固结系数范围为  $5 \times 10^{-5} \sim 4 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{s}$ , 加瑞等<sup>[23]</sup> 得到日本有明海沿岸黏土的固结系数基本处于  $10^{-6} \sim 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{s}$

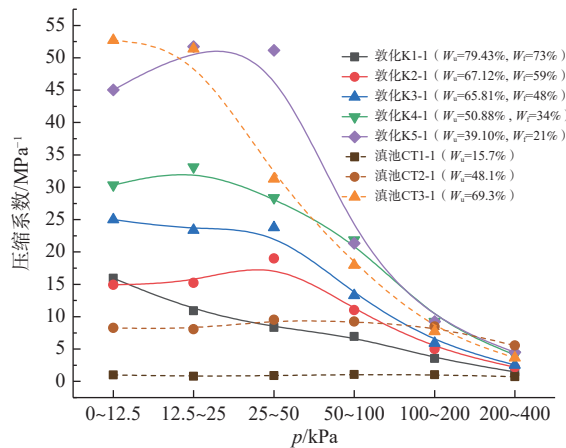


图 3 各土样分级加载下  $a_v$ - $p$  曲线

Fig. 3  $a_v$ - $p$  curves of each soil sample under graded loading

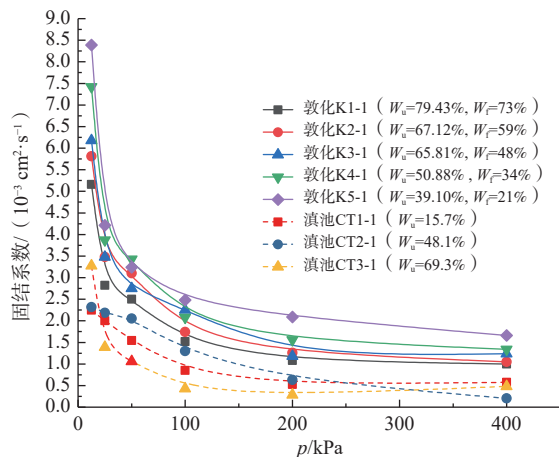


图 4 各土样分级加载下的  $C_v$ - $p$  曲线

Fig. 4  $C_v$ - $p$  curves of each soil sample under graded loading

量级之间, 雷华阳等<sup>[24]</sup> 得到天津地区吹填软土的固结系数范围为  $3.8 \times 10^{-5} \sim 1.4 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{s}$ 。图 4 中吉林敦化草炭土样的固结系数范围为  $1.00 \times 10^{-3} \sim 8.39 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{s}$ ,

云南滇池泥炭土样<sup>[18]</sup>固结系数范围为  $0.21 \times 10^{-3} \sim 3.23 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{s}$ 。吉林敦化草炭土固结系数比淤泥、黏土、软土高, 与云南滇池泥炭土样<sup>[18]</sup>相比, 草炭土的固结系数更大。固结系数随固结压力的增加而逐渐下降。固结压力在 12.5 ~ 100 kPa 区间时, 固结系数陡降趋势明显, 云南滇池泥炭土样<sup>[18]</sup>也有类似的规律。

对 5 种纤维含量草炭土固结系数和固结压力进行幂函数拟合, 结果如表 5 所示, 两者相关性较高, 可为实际工程提供一定指导。

### 3.4 草炭土的蠕变特性

#### 3.4.1 次固结系数

通过室内一维固结蠕变试验, 得到 5 种纤维含量

表 5 不同纤维含量草炭土的  $C_v$ - $p$  经验关系表达式

Table 5  $C_v$ - $P$  empirical relationship expression of the turfy soil with different fiber contents

$W_f/\%$	拟合公式	相关系数
21	$C_v=15.09p^{0.48}$	$R^2=0.96$
34	$C_v=19.43p^{0.50}$	$R^2=0.97$
48	$C_v=18.05p^{0.47}$	$R^2=0.94$
59	$C_v=21.72p^{0.49}$	$R^2=0.96$
73	$C_v=19.82p^{0.43}$	$R^2=0.93$

草炭土的  $e$ - $\lg t$  曲线(图 5)。 $e$ - $\lg t$  曲线均表现出反“S”型, 采用 Cassgrande 作图法确定其次固结系数  $C_\alpha$ 。

图 6 为吉林敦化草炭土与云南大理泥炭土<sup>[19]</sup>次固结系数随固结压力的变化曲线, 2 种土样的  $C_\alpha$ - $p$

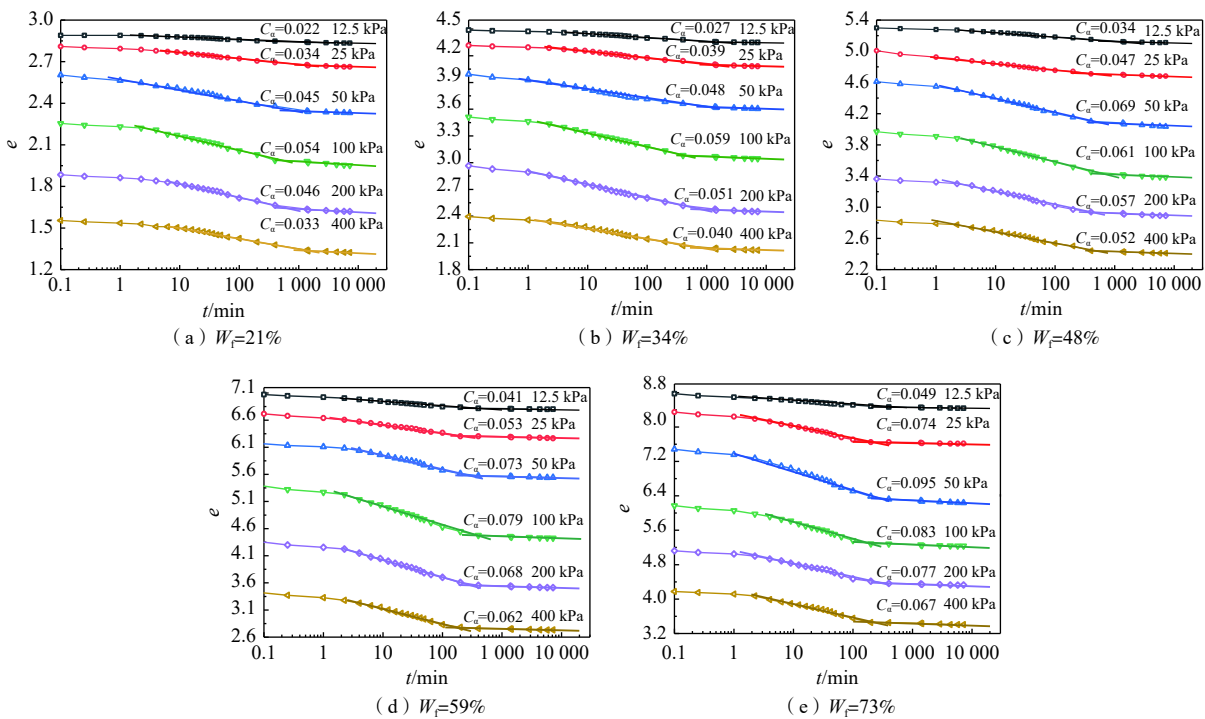


图 5 吉林敦化草炭土  $e$ - $\lg t$  曲线

Fig. 5  $e$ - $\lg t$  curve of the turfy soil near Dunhua in Jilin

曲线均呈现先上升、到达峰值后逐渐下降的趋势。吉林敦化土样次固结系数范围为 0.022 ~ 0.095, 峰值出现在固结压力 50 ~ 100 kPa 之间, 云南大理泥炭土样次固结系数的范围为 0.008 ~ 0.091, 峰值出现在固结压力 100 ~ 200 kPa 之间。固结压力一定时, 吉林敦化草炭土纤维含量越高, 次固结系数越大, 有机质含量越高, 次固结系数越大; 云南大理泥炭土样<sup>[19]</sup>次固结系数与有机质含量之间未表现出明显相关规律。

次固结系数  $C_\alpha$  出现峰值是因为土体次固结变形由土骨架刚度变化决定, 一方面, 分级加载过程中, 土

体结构逐渐破坏, 土骨架刚度降低; 另一方面, 固结压力的增加使得土体被压密, 提高了土骨架的刚度。两方面因素综合作用使得  $C_\alpha$  出现峰值点, 次固结系数  $C_\alpha$  峰值点可看作土体压密对土骨架刚度起主要作用的临界点。

#### 3.4.2 次固结系数 $C_\alpha$ 与压缩指数 $C_c$ 关系

Mesri 等<sup>[25]</sup> 等经过研究发现土的  $C_\alpha/C_c$  压缩法则。Walker 等<sup>[26]</sup> 对 Leda 地区黏土进行研究, 得出次固结系数  $C_\alpha$  与压缩指数  $C_c$  近似满足  $C_\alpha/C_c=0.025$ 。Brendan 等<sup>[27]</sup> 对多个地区的 11 种软黏土进行一维固结蠕变试

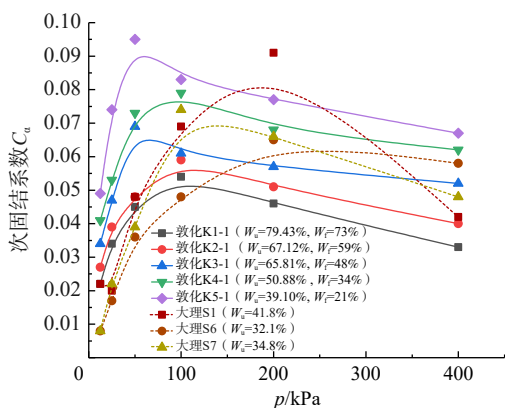


图 6 各土样分级加载下  $C_a$ - $p$  曲线

Fig. 6  $C_a$ - $p$  curves of each soil sample under graded loading

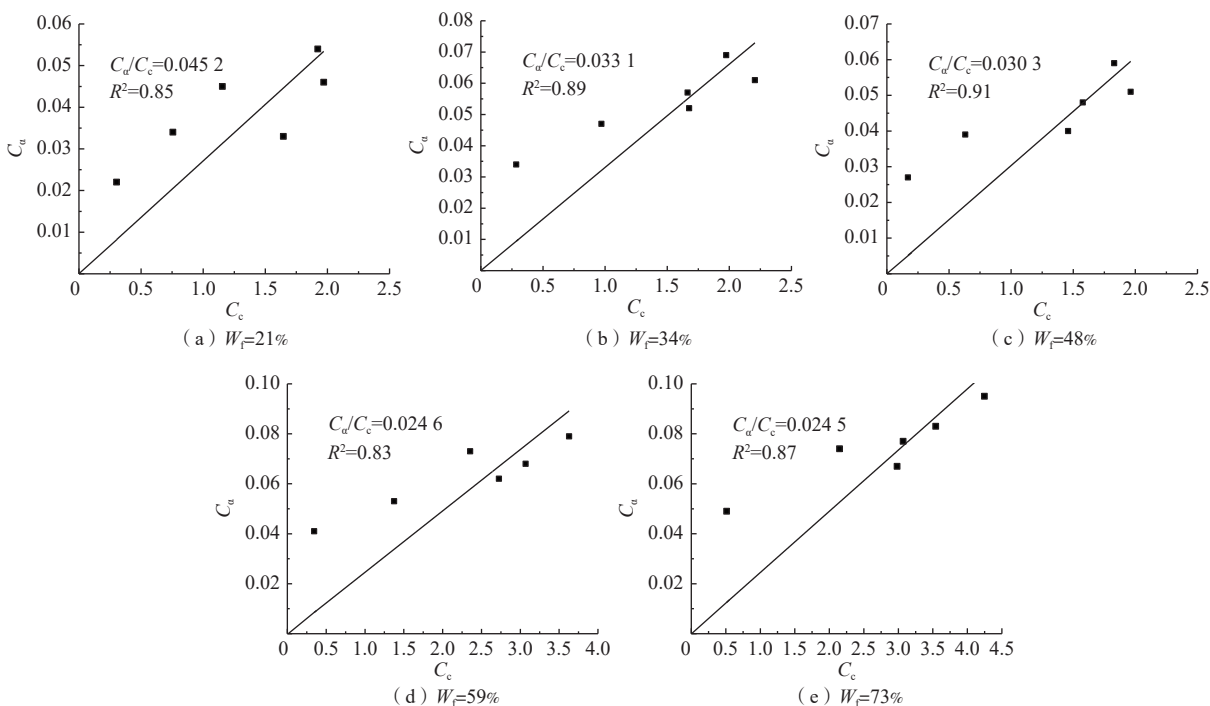


图 7 不同纤维含量草炭土  $C_a$ - $C_c$  关系曲线

Fig. 7  $C_a$ - $C_c$  curve of the turf soil with different fiber contents

性,纤维质量分数为 21%、34%、48%、59%、73% 的草炭土,  $C_a/C_c$  值分别是 0.045 2, 0.033 1, 0.030 3, 0.024 6, 0.024 5。

#### 4 结论

(1)敦化市江源镇草炭土的压缩系数范围为 1.49 ~ 51.74  $\text{MPa}^{-1}$ , 压缩系数随固结压力增加而减小, 固结压力一定时, 纤维含量越大, 压缩系数越大, 压缩性越强。

(2)固结系数的范围为  $1.00 \times 10^{-3} \sim 8.39 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{s}$ 。随着固结压力增大, 固结系数先快速减小, 当固结压

验总结得出富含有机质土的  $C_a/C_c=0.05 \sim 0.06$ , 碳酸钙含量较高黏土的  $C_a/C_c=0.02$ 。孙德安等<sup>[28]</sup>对上海饱和黏土进行试验得到  $C_a/C_c=0.033 6$ 。邓岳保等<sup>[29]</sup>发现宁波软土次固结系数  $C_a$  与压缩指数  $C_c$  近似符合  $C_a/C_c=0.02 \pm 0.01$ 。泥炭土的  $C_a/C_c$  值多处于 0.05 ~ 0.07 范围内<sup>[30]</sup>。从力学机理上来看,  $C_a$  和  $C_c$  体现应力和时间因素对土压缩变形的影响, 虽分属主固结和次固结两个阶段, 但有很好的相关性。因此在实际工程中可以用较易获得的  $C_c$  来预测相对难获得的  $C_a$ 。吉林敦化 5 种纤维含量草炭土  $C_a$ - $C_c$  曲线如图 7 所示。

5 种纤维含量草炭土的  $C_a$  和  $C_c$  具有一定的相关

力超过 200 kPa 后, 固结系数逐渐趋于稳定; 同一固结压力下, 纤维含量越高, 固结系数越大。对 5 种纤维含量草炭土固结系数和固结压力进行幂函数拟合, 拟合效果较好。

(3)次固结系数范围为 0.022 ~ 0.095, 在固结压力前期, 次固结系数随固结压力的增加而增大, 至峰值后逐渐减小, 峰值对应的固结压力介于 50 ~ 100 kPa 之间。固结压力一定时, 纤维含量越大, 固结蠕变越明显, 次固结系数越大。

(4)敦化市江源镇草炭土的  $C_a$  和  $C_c$  具有一定的相关性, 纤维质量分数为 21%、34%、48%、59%、73%

的草炭土对应的次固结系数与压缩指数比值( $C_a/C_c$ )分别是 0.045 2, 0.033 1, 0.030 3, 0.024 6, 0.024 5。

### 参考文献 (References) :

- [ 1 ] 刘柱, 佺磊. 吉林地区草炭土物理力学指标相关性试验研究[J]. *水文地质工程地质*, 2010, 37(4): 53 – 57. [ LIU Zhu, NIE Lei. Experimental research on the correlation of physical mechanics indexes of the turfey soil in the Jilin Area[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2010, 37(4): 53 – 57. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 2 ] 徐燕, 佺磊, 胡忠君. 季冻区草炭土工程地质特性研究[J]. *人民长江*, 2011, 42(10): 17 – 20. [ XU Yan, NAI Lei, HU Zhongjun. Study on engineering geological properties of turfey soil in seasonal frozen region[J]. *Yangtze River*, 2011, 42(10): 17 – 20. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 3 ] WHITLOW R. Basic soil mechanics[M]. 3th ed. London: Longman Group Limited, 1995.
- [ 4 ] RAZALI S N M, BAKAR I, ZAINORABIDIN A. Behaviour of peat soil in instrumented physical model studies[J]. *Procedia Engineering*, 2013, 53: 145 – 155.
- [ 5 ] 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.
- [ 6 ] JOHARI N N, BAKAR I, RAZALI S M, et al. Fiber effects on compressibility of peat[J]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2016, 136: 012036.
- [ 7 ] 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 Yue, YU Zhihua, LIU Haiming, et al. Experimental study of the change law of consolidation coefficient of the plateau lacustrine peaty soil[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2016, 35(Sup 1): 3259 – 3267. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 8 ] 吕岩, 佺磊, 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 turfey soil[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2011, 33(4): 655 – 660. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 9 ] MACFARLANE I C. The muskeg subcommittee[C]// Proc, Tench Muskeg Research Conf, National Research Council of Canada, Ottawa; Assoc. Ctee. on Soil and Snow Mech, Tech, Memo. 1965, 85: 1 – 5.
- [ 10 ] 桂跃, 余志华, 刘海明, 等. 高原湖相泥炭土次固结特性及机理分析[J]. *岩土工程学报*, 2015, 37(8): 1390 – 1398. [ GUI Yue, YU Zhihua, LIU Haiming, et al. Secondary consolidation properties and mechanism of plateau lacustrine peaty soil[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2015, 37(8): 1390 – 1398. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 11 ] 王竟宇, 王志良, 申林方, 等. 单向压缩状态下滇池泥炭土的蠕变特性研究[J]. *地下空间与工程学报*, 2020, 16(6): 1689 – 1695. [ WANG Jingyu, WANG Zhiliang, SHEN Linfang, et al. Study on consolidation creep properties of Dianchi peaty soil under one-dimensional compression[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2020, 16(6): 1689 – 1695. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 12 ] 冯瑞玲, 吴立坚, 张益铭. 泥炭土的固结特性试验研究[J]. *地下空间与工程学报*, 2019, 15(5): 1384 – 1392. [ FENG Ruiling, WU Lijian, ZHANG Yiming. Study on the consolidation properties of peaty soil[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2019, 15(5): 1384 – 1392. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 13 ] 李育红, 周庆云, 程芸. 滇池湖相泥炭土固结系数及次固结系数研究[J]. *工程勘察*, 2019, 47(5): 26 – 32. [ LI Yuhong, ZHOU Qingyun, CHENG Yun. Study on the coefficient of consolidation and secondary consolidation of lacustrine peat soil around the Dian Lake[J]. *Geotechnical Investigation & Surveying*, 2019, 47(5): 26 – 32. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 14 ] Standard test methods for moisture, ash, and organic matter of peat and other organic soils: ASTM D 2974—14[S]. 2014.
- [ 15 ] Standard test methods for laboratory determination of the fiber content of peat samples by dry mass: ASTM D 1997—13[S]. 2013.
- [ 16 ] Standard classification of peat samples by laboratory testing: ASTM D 4497—13[S]. 2007.
- [ 17 ] 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) ]
- [ 18 ] 方超. 高原湖相泥炭土工程性质原生各向异性试验



- 研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2019. [ FANG Chao. Experimental study on inherent anisotropy of engineering properties of plateau lacustrine peat soil[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2019. (in Chinese with English abstract) ]
- [19] 彭博. 云南大理地区强泥炭质土固结特性的试验研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2019. [ PENG Bo. Experimental study on consolidation of peat soil in Dali area of Yunnan[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019. (in Chinese with English abstract) ]
- [20] ONITSUKA K, HONG Z S, HARA Y, et al. Interpretation of oedometer test data for natural clays[J]. *Soils and Foundations*, 1995, 35(3): 61 – 70.
- [21] HONG Z S, ONITSUKA K. A method of correcting yield stress and compression index of ariake clays for sample disturbance[J]. *Soils and Foundations*, 1998, 38(2): 211 – 222.
- [22] 沈珠江. 软土工程特性和软土地基设计[J]. *岩土工程学报*, 1998, 20(1): 100 – 111. [ SHEN Zhujiang. Engineering properties of soft soils and design of soft ground[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1998, 20(1): 100 – 111. (in Chinese with English abstract) ]
- [23] 加瑞, 雷华阳. 有明黏土各向异性固结特性的试验研究[J]. *岩土力学*, 2019, 40(6): 2231 – 2238. [ JIA Rui, LEI Huayang. Experimental study of anisotropic consolidation behavior of Ariake clay[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2019, 40(6): 2231 – 2238. (in Chinese with English abstract) ]
- [24] 雷华阳, 任倩, 张文振, 等. 吹填超软土固结特性试验分析[J]. *工程地质学报*, 2014, 22(6): 1039 – 1045. [ LEI Huayang, REN Qian, ZHANG Wenzhen, et al. Consolidation property of ultra soft soil[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2014, 22(6): 1039 – 1045. (in Chinese with English abstract) ]
- [25] MESRI G, GODLEWSKI P M. Time and stress compressibility interrelationship[J]. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 1977, 103(5): 417 – 430.
- [26] WALKER L K. Undrained creep in a sensitive clay[J]. *Géotechnique*, 1969, 19(4): 515 – 529.
- [27] O'KELLY B C. Compression and consolidation anisotropy of some soft soils[J]. *Geotechnical & Geological Engineering*, 2006, 24(6): 1715 – 1728.
- [28] 孙德安, 申海娥. 上海软土的流变特性试验研究[J]. *水文地质工程地质*, 2010, 37(3): 74 – 78. [ SUN Dean, SHEN Haie. Experimental study on rheology behaviour of Shanghai soft clay[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2010, 37(3): 74 – 78. (in Chinese with English abstract) ]
- [29] 邓岳保, 陈菲, 刘干斌, 等. 宁波土层的流变固结试验及流变模型参数研究[J]. *水文地质工程地质*, 2017, 44(5): 46 – 51. [ DENG Yuebao, CHEN Fei, LIU Ganbin, et al. A study of the rheological consolidation test and rheological model parameters for the Ningbo soil layer[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2017, 44(5): 46 – 51. (in Chinese with English abstract) ]
- [30] BERRY P L, VICKERS B. Consolidation of fibrous peat[J]. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 1975, 101(8): 741 – 753.

编辑: 张明霞