

季冻区草炭土非线性K-G模型试验研究

高康¹, 徐燕^{*1}, 胡天明², 韩伶敏¹

(1. 吉林大学建设工程学院, 吉林 长春 130026; 2. 中国铁路设计集团有限公司, 天津 300251)

摘要:季冻区草炭土是沼泽环境中植物残体在氧化分解作用下, 堆积形成的含有大量未分解纤维残体的特殊土。草炭土纤维及其含量对其强度和变形特性具有重要影响, 目前考虑纤维含量对草炭土强度和变形特性影响的本构关系研究还相对匮乏。K-G本构模型因其模型参数与土的体积模量和剪切模量能建立直接联系, 因此在岩土工程非线性理论和数值计算分析方面广泛应用。以不同纤维含量的草炭土为研究对象, 进行三轴剪切试验, 研究了草炭土的应力应变曲线, 得到了草炭土非线性K-G模型参数, 分析了各模型参数随纤维含量的变化规律, 建立了模型参数与纤维含量之间的线性函数关系。对实际公路工程建设具有一定的指导意义。

关键词:季冻区草炭土; 纤维含量; 非线性K-G模型; 模型参数

中图分类号: TU43 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2021)01-0112-08

Experimental study on nonlinear K-G model for turfy soil in the seasonal frozen zone

GAO Kang¹, XU Yan^{*1}, HU Tianming², HAN Lingmin¹

(1. College of Construction Engineering, Jilin University, Changchun Jilin 130026, China;

2. Railway Design Corporation of China, Tianjin 300251, China)

Abstract: Turfy soil in the seasonal frozen area is a special soil containing a large amount of undecomposed fiber residues formed by the accumulation of plant residues in the swamp environment under the action of oxidation and decomposition. The turfy soil fiber and its content have an important impact on the strength and deformation characteristics of turfy soil. At present, the research on the constitutive relationship considering the influence of fiber content on the strength and deformation characteristics of turfy soil is relatively scarce. The K-G constitutive model is widely used for nonlinear theoretical and numerical calculation analysis in geotechnical engineering because the model parameters can be directly connected with the bulk modulus and shear modulus of soil. Taking turfy soil with different fiber content as the research subject, the stress-strain curve of turfy soil was studied by triaxial shear test, and the nonlinear K-G model parameters of turfy soil were obtained. The linear function relationship between model parameters and fiber content was established. It can provide some guidance for actual highway construction.

Key words: turfy soil in the seasonal frozen zone; fiber content; nonlinear K-G model; model parameters

0 引言

草炭土是沼泽环境中植物残体在氧化分解作用下, 堆积形成的含有大量未分解纤维残体、腐殖

质和矿物质, 且形成年代在1万年以内的特殊土^[1-2]。草炭土在国内外均有广泛分布, 如国外俄罗斯西伯利亚地区、加拿大中部 Alberta 和我国东北地

收稿日期: 2020-10-16; 修回日期: 2020-10-28 DOI: 10.12143/j.ztgc.2021.01.015

基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助项目“乾安泥林土的工程地质特性对泥林潜蚀作用影响机制研究”(编号: 41702300); 国家自然科学基金资助项目“线路工程对季冻区草炭土湿地的环境效应研究”(编号: 41572254)

作者简介: 高康, 男, 汉族, 1995年生, 硕士研究生在读, 桥梁与隧道工程专业, 吉林省长春市朝阳区西民主大街938号, 290375408@qq.com。

通信作者: 徐燕, 女, 汉族, 1981年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为特殊土的工程地质性质, 吉林省长春市朝阳区西民主大街938号, xuyan8102@jlu.edu.cn。

引用格式: 高康, 徐燕, 胡天明, 等. 季冻区草炭土非线性K-G模型试验研究[J]. 钻探工程, 2021, 48(1): 112-119.

GAO Kan, XU Yan, HU Tianming, et al. Experimental study on nonlinear K-G model for turfy soil in the seasonal frozen zone[J]. Drilling Engineering, 2021, 48(1): 112-119.

区的大小兴安岭、川西地区的山脉、青藏高原和新疆部分山区等季冻区^[3],具有高孔隙比、高纤维含量等特性,工程性质较差^[4]。近些年来,公路建设不可避免地会在草炭土地区展开^[5-6]。佴磊等学者^[7-10]通过野外调查和室内试验对草炭土的基本物理力学性质进行了分析,并总结了草炭土特殊的工程地质性质。这些研究在草炭土的基本力学性质方面取得了很大进展,但考虑纤维含量对草炭土强度和变形影响的本构关系研究相对匮乏。E- μ 模型和K-G模型是常用的土体非线性弹性本构模型^[11]。相较于E- μ 模型,K-G模型的参数物理意义明确,且易于测定^[12-13]。非线性弹性K-G模型是一种反映了土体在平均正应力 p 和广义剪应力 q 作用下的弹性性质的双模量本构模型。国内外许多学者对该模型进行了大量研究并提出多种修正模型。1975年Domaschuk和Valliappan^[14]率先基于该模型来进行有限元计算,国内的曾以宁等^[15]、洪夏^[16]建立了成都科大K-G模型。在此基础上,一些学者^[17-19]考虑压硬性得到了双模量K-G模型;也有一些学者^[13,20-26]在考虑剪胀性的基础上建立了3模量K-G模型。文畅平^[13]和吴小锋等^[27]分别基于扰动状态理论和综合结构势提出了修正的K-G模型。本文拟采用等向固结和等 p 固结排水试验,在考虑纤维含量变化的基础上,建立草炭土Naylor修正非线性弹性K-G模型,并获得K-G模型参数与纤维含量的关系表达式。

1 K-G模型基本框架

非线性弹性K-G模型是基于广义Hooke定律建立^[28],其体积变形模量 K_t 和切线剪切模量 G_t 与应变增量的关系式为: $dp=K_t d\epsilon_v$, $dq=G_t d\epsilon_s$ 。 K_t 和 G_t 表达式为

$$K_t = K_i + \alpha_k p \quad (1)$$

$$G_t = G_i + \alpha_G p + \beta_G q \quad (2)$$

通过等向固结排水三轴试验可以对 K_t 进行求解^[29-31]。首先通过试验得到 ϵ_v-p 曲线,并通过坐标变换转化为 $\epsilon_v-\ln(p)$ 关系曲线,曲线大致呈直线状,其斜率为 k ,在 ϵ_v 轴上的截距为 ϵ_{v0} ,于是 $\epsilon_v-\ln(p)$ 直线可表示为: $\epsilon_v = \epsilon_{v0} + k \ln(p)$,对其进行微分,可得:

$$K_t = \frac{dp}{d\epsilon_v} = \frac{p}{k} \quad (3)$$

$$\epsilon_v = \frac{1}{\alpha_k} \ln \left(1 + \frac{\alpha_k}{K_i} p \right) \quad (4)$$

Domaschuk和Valliappan^[14]提出,在等向固结排水试验中,可将 $p-\epsilon_v$ 关系曲线拟合为: $p = a\epsilon_v^k$ (式中 a, k 为试验常数)。因此,先根据试验结果拟合出函数表达式;再依据 $K = dp/d\epsilon_v$,计算各数据点在幂函数上的斜率 K 值;最后绘制出 $K-p$ 关系曲线,并通过直线拟合,求得截距 K_i 和斜率 α_k 。依此,分别计算不同纤维含量 ω_i 条件下的数据,即可得到相应的 K_i 和 α_k 值。

通过等 p 三轴剪切试验对 G_t 进行求解,在试验得到 $q-\epsilon_s$ 曲线的基础上,将 $3G_t$ 视为该曲线的斜率,表示为

$$3G_t = \frac{dq}{d\epsilon_s} \quad (5)$$

当 $G_t=0$ 时土体破坏,摩尔-库仑极限平衡方程为 $q=n+mp$ 。结合式(2)可得

$$G_i = -n\beta_G \quad (6)$$

$$\alpha_G = -m\beta_G \quad (7)$$

$$\beta_G = \frac{G_t}{q-n-mp} \quad (8)$$

对式(5)积分并根据式(2)或式(6)~(8),得到

$$\epsilon_s = \frac{1}{3\beta_G} \ln \left(1 + \frac{\beta_G}{G_i + \alpha_G p} q \right) \quad (9)$$

或

$$\epsilon_s = \frac{1}{3\beta_G} \ln \left(1 - \frac{1}{n+mp} q \right) \quad (10)$$

Domaschuk、Valliappan^[14]和Kondner^[32]指出,在等 p 三轴剪切试验中,可将 $q-\epsilon_s$ 关系曲线拟合为: $q = \epsilon_s / (a + b\epsilon_s)$ (式中 a, b 为试验常数)。 G_t, α_G 和 β_G 可以通过对平均正应力 p 和广义剪应力 q 使用摩尔-库仑准则计算得到。首先通过等 p 三轴固结排水剪切试验,得到不同等 p 条件下的 $q-\epsilon_s$ 曲线,根据 $q-\epsilon_s$ 曲线,确定不同等 p 条件下土体破坏状态时的 q 值,绘制出 $q-p$ 关系曲线,并进行直线拟合,从而得到 m, n 的值。在此基础上依据式(10),分别计算不同 p 值条件下的 β_G 值,并取算数平均值,最后将 β_G 值代入式(6)~(7),即可计算出 G_i 和 α_G 。依此,得到不同纤维含量 ω_i 条件下的 β_G, G_i 和 α_G 。

2 试验材料与方法

2.1 试验材料

季冻区草炭土试验土样取自吉林省敦化市江源镇南侧,鹤大公路草炭土工程试验段,起止里程K1+30—K2+520,实景照片如图1所示。敦化市地处北半球中温带,气候类型为寒温带湿润大陆性季风气候,年平均气温和降雨量为 $2.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 519.3 mm ,全年无霜期为 119 d ,属季冻区,最大冻土深度 1.77 m 。为了保持土样的原状性,采用具有固定活塞的薄壁取土器钻取,取样深度 $0\sim 2.5\text{ m}$,为地表下典型草炭土层。土样土质较疏松,孔隙较大,呈暗褐色,纤维呈团块状和絮状,所取土样基本物理指标如表1所示。依据《ASTM D1997-13》^[33]采用水洗法进行纤维含量的测定;依据《ASTM D2974-14》^[34]采用烧失量法进行有机质含量的测定。

2.2 试验方法

依据标准^[35]制备纤维含量为 20.95% 、 30.71% 、 42.12% 、 50.30% 、 60.14% 和 70.12% 的三轴原状试



图1 取样点

Fig.1 Sample location

样,部分土样见图2。试验采用TSZ-1型三轴仪对上述草炭土试样进行三轴剪切试验。

(1)在等向固结排水试验中,进行平行测定,在11级围压(50 、 75 、 100 、 125 、 150 、 175 、 200 、 250 、 300 、 350 、 400 kPa)下排水固结,固结完成以排水量稳定为标准,待试样固结完成后再开始下一级加载。

(2)在等 p 三轴固结排水剪切试验中,分别在 100 、 200 、 300 、 400 kPa 围压下进行固结剪切。剪切

表1 草炭土的主要物理指标

Table 1 Main physical indexes of the turfy soil samples

土样编号	取土深度/cm	含水率 $W/\%$	孔隙比 e_0	天然密度/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	相对密度 G_s	纤维含量 $\omega_t/\%$	有机质含量 $W_u/\%$
1	10~30	357.86	11.02	0.96	1.48	70.12	78.56
2	60~80	356.65	10.15	0.98	1.49	60.14	61.78
3	120~140	331.96	9.93	1.06	1.50	50.30	59.12
4	150~170	306.27	9.83	1.07	1.56	42.12	58.07
5	190~210	292.24	5.46	1.35	1.94	30.71	54.46
6	210~230	257.53	3.56	1.48	2.24	20.95	43.40



(a)



(b)

图2 试验土样

Fig.2 Soil samples

过程中保持 p 值不变。剪切速率 0.015 mm/min , 当应变超过 20% 时, 试验终止。

3 试验结果与分析

3.1 ϵ_v-p 曲线和 ϵ_s-q 曲线

通过等向固结排水试验, 得到不同纤维含量下草炭土的体积应变 ϵ_v 随平均正应力 p 和纤维含量 ω_f 的变化关系曲线, 如图3所示。 ϵ_v 和 p 关系符合模型的基本假定, 呈幂函数关系。且土体的体积应变 ϵ_v 随 p 的增大呈现出非线性增长, 即土体不断被压缩。在 p 不变的条件下, 当草炭土中纤维含量增加时, 体积应变 ϵ_v 随之增加。这是因为纤维和土颗粒间的孔隙随着纤维含量的增加而增多, 这导致在受到外力时土体的抗压缩变形能力降低。

通过等 p 三轴固结排水剪切试验, 得到不同纤维含量季冻区草炭土的剪切应变 ϵ_s 与广义剪应力 q 的关

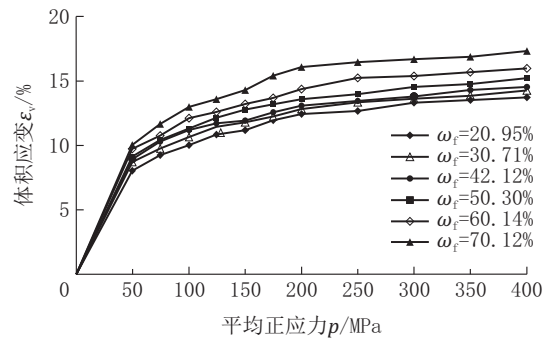


图3 ϵ_v-p 关系

Fig.3 Relationship of ϵ_v-p

系曲线, 见图4。 q 和 ϵ_s 关系符合模型的基本假定, 呈双曲线函数关系。 $q-\epsilon_s$ 曲线在 p 值一定的条件下, 偏应力 q 值随纤维含量的增加而增加, 斜率逐渐变缓, 呈非线性。这说明草炭土抗剪能力不断提高。这是因为纤维含量的增加, 形成了天然的“加筋作用”, 增强了土体的结构性, 提高了土体的抗剪切能力。

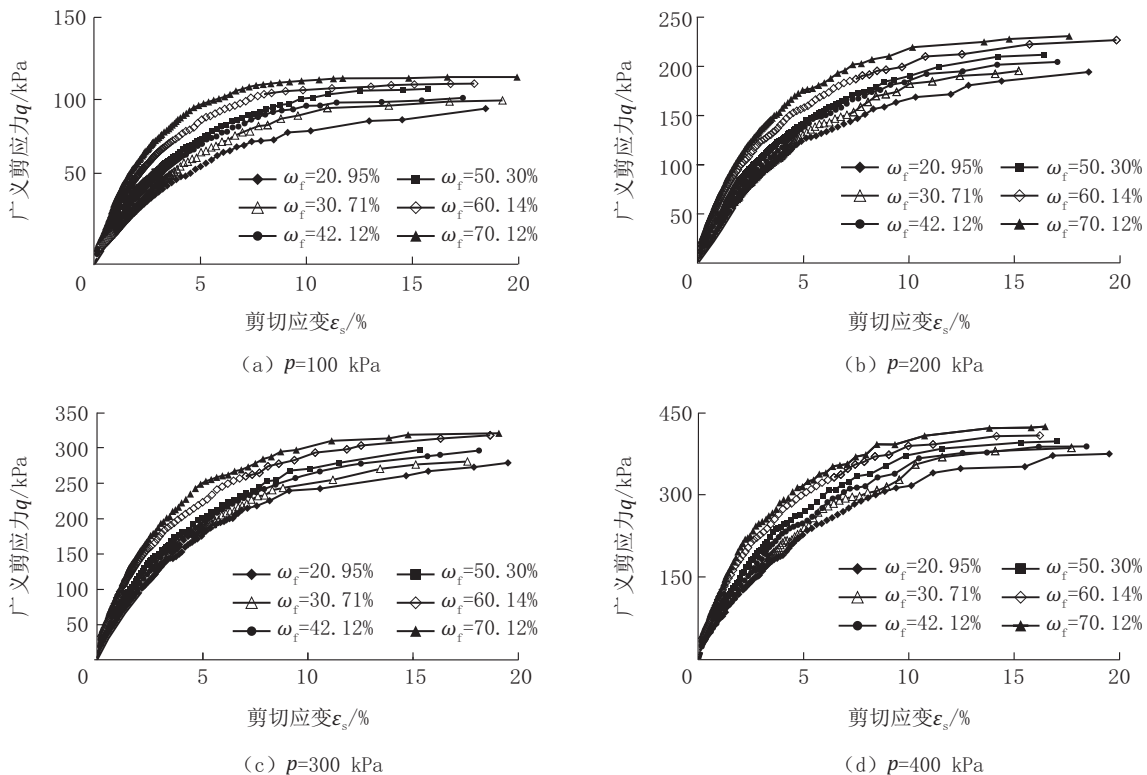


图4 ϵ_s-q 曲线

Fig.4 Relationship of ϵ_s-q

3.2 季冻区草炭土非线性K-G模型参数

对等向固结排水试验得到的 ϵ_v-p 曲线进行了 $p-\epsilon_v$ 曲线拟合, 结果见表2, 进而得到不同纤维含量

下的 K_1 和 α_k 值。

根据 $q-\epsilon_s$ 曲线, 并结合摩尔-库仑破坏理论, $q=n+mp$ 的拟合结果见表3。进而得到参数 m, n 数

值,并由表中的 m 、 n 值计算 β_G ,并由 β_G 得到 G_i 和 α_G ,如表 4 所示。

表 2 p - ϵ_v 曲线拟合结果Table 2 p - ϵ_v curve fitting results

纤维含量/%	p - ϵ_v	R^2
20.95	$P=0.0137\epsilon_v^{3.8604}$	0.9565
30.71	$P=0.0058\epsilon_v^{4.1405}$	0.9817
42.12	$P=0.0024\epsilon_v^{4.4631}$	0.9756
50.30	$P=0.0048\epsilon_v^{4.1182}$	0.9764
60.14	$P=0.0059\epsilon_v^{3.9519}$	0.9760
70.12	$P=0.0116\epsilon_v^{3.5782}$	0.9394

表 3 $q=n+mp$ 曲线拟合结果Table 3 $q=n+mp$ curve fitting results

纤维含量/%	$q=n+mp$	R^2
20.95	$q=3.54+0.868p$	0.9976
30.71	$q=4.83+0.935p$	0.9977
42.12	$q=8.34+0.938p$	0.9985
50.30	$q=14.56+0.949p$	0.9987
60.14	$q=16.18+0.983p$	0.9984
70.12	$q=17.13+1.015p$	0.9982

表 4 季冻区草炭土非线性 K-G 模型参数

Table 4 Nonlinear K-G model parameters of turf soil in the seasonal frozen zone

模型 参数	纤维含量/%					
	20.95	30.71	42.12	50.30	60.14	70.12
K_i /kPa	21.46	19.96	19.18	18.79	18.27	17.23
α_k	0.244	0.225	0.206	0.197	0.185	0.132
m	0.868	0.935	0.938	0.949	0.983	1.015
n	3.54	4.83	8.34	14.56	16.18	17.13
β_G	-4.51	-4.57	-4.58	-4.59	-4.62	-4.69
G_i /MPa	15.99	22.09	38.22	66.76	74.76	80.37
α_G	3.92	4.28	4.30	4.36	4.54	4.76

3.3 参数随纤维含量的变化规律分析

根据上述分析可知:参数 K_i 和 α_k 反映了平均正应力 p 对切线体积模量 K_i 的影响,随着纤维含量的增加草炭土的 K_i 逐渐减小, ϵ_v 则不断变大,这说明随着纤维含量的增加,草炭土的抗压缩变形能力降低。纤维含量对参数 m 和 β_G 影响较小,对参数 n 、 G_i 和 α_G 影响较大。参数 n 、 G_i 和 α_G 随纤维含量显著增大,因此,纤维含量的变化对草炭土的切线剪切模

量影响显著。由于 $\beta_G < 0$,根据式(2),切线剪切模量 G_i 随 q 增大而减小,但由于 β_G 值较小, $q\beta_G$ 部分所占比例较小,因而 q 值对 G_i 的影响相对较小。这说明随着纤维含量的增加,草炭土的抗剪切能力增强。另一方面,在计算过程中表 2 和表 3 的曲线拟合度均较高,说明该 Naylor K-G 模型可以很好地描述草炭土的非线性应力-应变关系。

各模型参数随纤维含量 ω_f 的变化规律曲线如图 5 所示,拟合关系表达式见式(11)。各模型参数与纤维含量均呈现出较好的线性函数关系,拟合度较高。

$$\left. \begin{aligned} K_i &= -7.797\omega_f + 22.714 \\ \alpha_k &= -0.202\omega_f + 0.2903 \\ m &= 0.0025\omega_f + 0.8336 \\ n &= 0.3092\omega_f + 3.1507 \\ \beta_G &= -0.0029\omega_f - 4.4649 \\ G_i &= 1.4533\omega_f + 15.668 \\ \alpha_G &= 0.0145\omega_f + 3.7089 \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

4 结论

(1)通过等向固结排水试验和等 p 三轴固结排水剪切试验获得 ϵ_v - p 曲线和 ϵ_s - q 曲线,两者均为应变硬化型曲线, ϵ_v - p 曲线符合幂函数曲线特征, ϵ_s - q 曲线符合双曲线特征。在此基础上,确定了草炭土 Naylor K-G 模型 7 个参数值(K_i 、 α_k 、 m 、 n 、 β_G 、 G_i 和 α_G),计算过程曲线拟合度较高,表明该 Naylor K-G 模型能较好地描述季冻区草炭土的非线性应力-应变关系。

(2)随着纤维含量的增加,草炭土切线体积模量 K_i 显著减小、切线剪切模量 G_i 显著增加,表明随着纤维含量的增加,季冻区草炭土的抗压缩变形能力降低,抗剪切能力增强。

(3)草炭土 Naylor 修正非线性弹性 K-G 模型的 7 个参数(K_i 、 α_k 、 m 、 n 、 β_G 、 G_i 和 α_G)和纤维含量 ω_f 之间呈现出较好的线性函数关系。

(4)在分析实际公路工程建设问题时,基于本文建立的季冻区草炭土非线性模型,只需在实际工程时用测得的季冻区草炭土的纤维含量就可以得到草炭土的模型参数,进而通过数值模拟分析计算不同纤维含量条件下季冻区草炭土的沉降变形,不仅可以保证工程的顺利进行,且模型形式简单、易于接受,对实际公路工程建设具有一定的指导

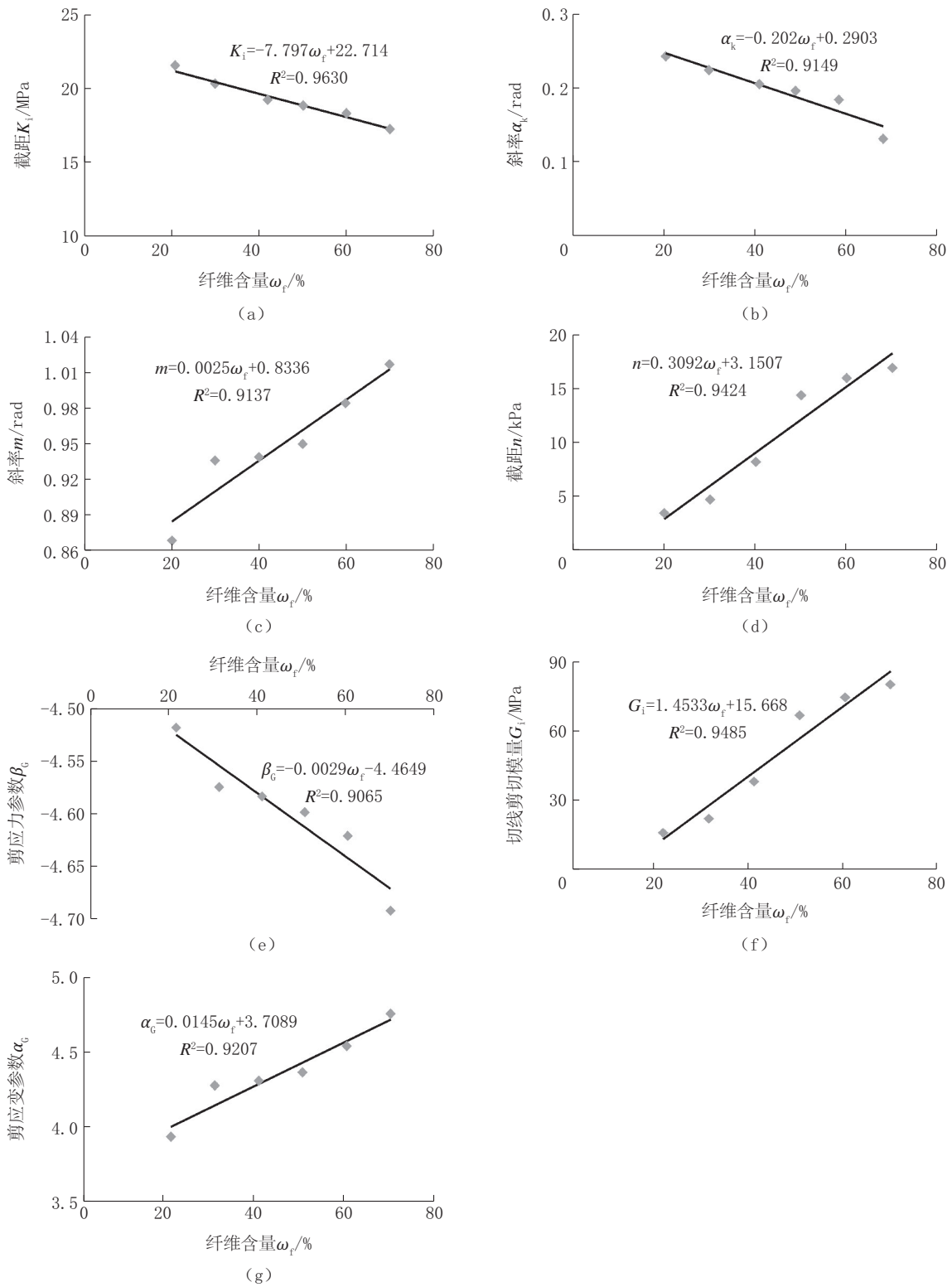


图5 非线性K-G模型参数与纤维含量关系曲线

Fig.5 Curve of the parameters of the nonlinear K-G model vs fiber content

意义。

参考文献(References):

- [1] 佺磊, 苏占东, 徐丽娜, 等. 中国主要沼泽草炭土的形成环境及分布特征[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2012, 42(5): 1477-1484.
NIE Lei, SU Zhandong, XU Lina, et al. Formation environment and distribution characteristics of main swamp turfy soil in China[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2012, 42(5): 1477-1484.
- [2] 苏占东. 吉林省东部地区沼泽草炭土的应力路径本构模型研究[D]. 长春: 吉林大学, 2015.
SU Zhandong. Study on the stress path constitutive model of swamp grass charcoal soil in eastern Jilin Province[D]. Changchun: Jilin University, 2015.
- [3] 徐燕, 胡天明, 孙炜, 等. 季冻区草炭土直剪特性研究[J]. 人民长江, 2019, 50(9): 209-213.
XU Yan, HU Tianming, SUN Wei, et al. Study on direct shear characteristics of turfy soil in seasonal frozen region[J]. Yangtze River, 2019, 50(9): 209-213.
- [4] 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.
LÜ Yan, NIE Lei, XU Yan, et al. The mechanism of organic matter effect on physical and mechanical properties of turfy soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(4): 655-660.
- [5] 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, NIE Lei, HU Zhongjun. Study on engineering geological characteristics of turfy soil in seasonal frozen region[J]. Yangtze River, 2011, 42(10): 17-20.
- [6] 徐燕. 季冻区草炭土工程地质特性及变形沉降研究[D]. 长春: 吉林大学, 2008.
XU Yan. Research on engineering geological characteristics and deformation and settlement of grass charcoal soil in seasonal frozen area[D]. Changchun: Jilin University, 2008.
- [7] 赵华, 佺磊, 梁兵. 吉林敦化地区草炭土的工程性质[J]. 岩土工程技术, 2004, 18(6): 311-314.
ZHAO Hua, NIE Lei, LIANG Bing. Geotechnical character of turfy soil in Dunhua area, Jilin Province[J]. Geotechnical Engineering Technique, 2004, 18(6): 311-314.
- [8] 金健康, 佺磊. 鹤大公路草炭土工程地质特性研究[J]. 城市道桥与防洪, 2004(6): 113-115, 7.
JIN Jiankang, NIE Lei. Study on eological characteristics of grass-charcoal earth project of Heda Highway[J]. Urban Roads and Bridges and Flood Control, 2004(6): 113-115, 7.
- [9] 韩玉民. 草炭土地基冻胀特性试验研究[J]. 森林工程, 2009, 25(1): 55-58.
HAN Yumin. Study on turfy soil foundation frost heave characteristics[J]. Forest Engineering, 2009, 25(1): 55-58.
- [10] 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 physico mechanics indexes of the turfy soil in the Jilin Area[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2010, 37(4): 53-57.
- [11] 黄文熙. 土的工程性质[M]. 北京: 水利电力出版社, 1983.
HUANG Wenxi. Engineering properties of soil[M]. Beijing: Hydraulic and Electric Power Press, 1983.
- [12] 胡再强, 马素青, 李宏儒. 非饱和黄土非线性K-G模型试验研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(S1): 56-60.
HU Zaiqiang, MA Suqing, LI Hongru. Research on non-linear K-G model test of unsaturated loess[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(S1): 56-60.
- [13] 文畅平. 基于扰动状态理论的生物酶改良膨胀土K-G模型[J]. 中国公路学报, 2018, 31(2): 308-318.
WEN Changping. K-G model of bioenzyme-treated expansive soil based on disturbed state theory[J]. China Journal of Highway Transport, 2018, 31(2): 308-318.
- [14] Domaschuk L, Valliappan P. Nonlinear settlement analysis by finite element[J]. ASCE J Geotech Eng Div, 1975, 101(7): 601-614.
- [15] 曾以宁, 屈智炯, 刘凯明. 土的非线性K-G模型的试验研究[J]. 成都科技大学学报, 1985(4): 143-149.
ZENG Yining, QU Zhijiong, LIU Kaiming. Experimental study on nonlinear K-G model of soil[J]. Journal of Chengdu University of Science and Technology, 1985(4): 143-149.
- [16] 夏洪. 普遍应力状态下的内勒弹性非线性K-G模型[J]. 岩土工程学报, 1985(2): 92-101.
XIA Hong. Neeller elastic nonlinear K-G model under universal stress[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1985(2): 92-101.
- [17] Naylor D J. Stress-strain laws for soils[C]//Developments in Soil Mechanics. Essex: Applied Science Publishers Ltd, 1978: 39-68.
- [18] 高莲士, 汪召华, 宋文晶. 非线性解耦K-G模型在高面板堆石坝应力变形分析中的应用[J]. 水利学报, 2001(10): 1-7.
GAO Lianshi, WANG Zhaohua, SONG Wenjing. The application of nonlinear uncoupled K-G model to deformation analysis of high concrete rockfill dam[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2001(10): 1-7.
- [19] 刘斯宏, 姚仰平, 孙德安, 等. 剪胀K-G模型及其有限元数值分析[J]. 土木工程学报, 2004, 37(9): 69-74.
LIU Sihong, YAO Yangping, SUN Dean, et al. Nonlinear elastic K-G soil model dilatancy and its fem application[J]. China Civil Engineering Journal, 2004, 37(9): 69-74.
- [20] Izumi H K, Kamemura K, Sato S. Finite element analysis of stresses and movements in excavations [C]//Proceedings of the 2nd International Conference on Numerical Methods in Geomechanics. Virginia, USA, 1976: 701-712.

- [21] Byrne P M, Eldridge T L. Three-parameter dilatant elastic stress-strain model for sand[C]//Proceedings of International Symposium on Numerical Models in Geomechanics. Zurich, Switzerland, 1982:73-80.
- [22] 殷建华. 土的三模量增量非线性模型及其推广[J]. 岩土力学, 2000, 21(1): 16-19, 53.
YIN Jianhua. Three-modulus incremental non-linear models of soil and generalization[J]. Rock and Soil Mechanics, 2000, 21(1): 16-19, 53.
- [23] 沈珠江. 理论土力学[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2000.
SHEN Zhujiang. Theoretical soil mechanics[M]. Beijing: China Water Conservancy and Hydropower Press, 2000.
- [24] 孙陶, 高希章. 考虑土体剪胀性和应变软化化的K-G模型[J]. 岩土力学, 2005, 26(9): 1369-1373.
SUN Tao, GAO Xizhang. Containing dilatancy and strain softening of earth's K-G model[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(9): 1369-1373.
- [25] 周葆春, 汪墨, 李全华, 等. 黏性土非线性弹性K-G模型的一种改进方法[J]. 岩土力学, 2008, 29(10): 2725-2730.
ZHOU Baochun, WANG Mo, LI Quanhua, et al. A modified method of nonlinear elastic K-G model for clay soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(10): 2725-2730.
- [26] 张玉云, 张建海, 何昌荣. 本构模型对高心墙堆石坝变位和应力计算的影响[J]. 人民长江, 2013, 44(19): 69-72.
ZHANG Yuyun, ZHANG Jianhai, HE Changrong. Influence of different constitutive models on displacement and stress of high core-wall rock-fill dam[J]. Yangtze River, 2013, 44(19): 69-72.
- [27] 吴小锋, 李光范, 胡伟, 等. 基于综合结构势概念的海口原状红黏土K-G模型修正[J]. 工程地质学报, 2013, 21(6): 973-980.
WU Xiaofeng, LI Guangfan, HU Wei, et al. Modification of K-G model of based on comprehensive structure potential for natural red soil in Haikou[J]. Journal of Engineering Geology, 2013, 21(6): 973-980.
- [28] 李广信, 林鸿州. 高等土力学教程[M]. 武汉: 武汉理工大学出版社, 2017.
LI Guangxin, LIN Hongzhou. Advanced soil mechanics course [M]. Wuhan: Wuhan University of Technology Press, 2017.
- [29] SDS 01—79, 土工试验规程[S].
SDS 01—79, Geotechnical test regulations[S].
- [30] 谢定义, 姚仰平, 党发宁. 高等土力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2008.
XIE Dingyi, YAO Yangping, DANG Fanning. Advanced soil mechanics[M]. Beijing: Higher Education Press, 2008.
- [31] 屈智炯, 刘恩龙. 土的塑性力学[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
QU Zhijiong, LIU Enlong. Plastic mechanics of soil[M]. Beijing: Science Press, 2011.
- [32] Kondner R L. Hyperbolic stress-strain response; cohesive soils [J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 1964, 82(S1): 115-143.
- [33] ASTM D 1997—13, Standard test method for laboratory determination of the fiber content of peat samples by dry mass [S]. West Conshohocken. PA, USA: American Society for Testing and Materials, 2013.
- [34] ASTM D 2974—14, Standard test methods for moisture, ash, and organic matter of peat and other organic soils [S]. West Conshohocken. PA, USA: American Society for Testing and Materials, 2014.
- [35] GB/T 50123—2019, 土工试验方法标准[S].
GB/T 50123—2019, Geotechnical test method standard[S].

(编辑 周红军)