

含水量对珠三角软土时效变形特性影响试验分析与模型研究

童华炜¹, 方晓填¹, 刘柱辉², 袁 杰¹

(1. 广州大学 土木工程学院, 广东 广州 510006; 2. 中交(广州)铁道设计研究院有限公司, 广东 广州 510290)

摘要: 软土时效变形特性对于建筑物的稳定性有着重要影响。通过室内直剪蠕变试验, 在相同试验条件下完成了 5 组不同含水量及不同应力水平试样时效变形特性的测试, 获得了试样含水量与时效变形特性的关系, 研究含水量对珠三角软土时效变形特性的影响。试验结果表明, 该地区软土变形时效特性明显, 含水量是影响软土时效变形特性的重要因素之一。采用五元 Kelvin 模型和西原正夫模型对试验曲线进行拟合分析, 两个模型在不同含水量、不同应力水平组合下的拟合与试验结果都具有良好的一致性, 且两个模型拟合效果具有互补性。引入邓肯-张模型非线性 E-v 模型, 使西原正夫模型在低含水量低荷载时的拟合效果显著提高。

关键词: 珠江三角洲; 软土; 时效变形; 直剪蠕变; 含水量; 模型分析

中图分类号: TU411

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2019)02-0168-09

Experimental analysis and model study on the influence of water content on the aging deformation characteristics of soft soil in Pearl River delta

TONG Huawei¹, FANG Xiaotian¹, LIU Zhuhui², YUAN Jie¹

(1. School of Civil Engineering, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China;

2. CCCC(Guangzhou) Railway Consultants CO., LTD, Guangzhou 510290, China)

Abstract: The time-dependent deformation characteristic of soft soil has an important influence on the stability of the building. Through direct shear creep test in laboratory, 5 groups of different water content and different stress levels of the sample time-dependent deformation characteristics were tested under the same conditions, the relationship between water content of the specimen and the time-dependent deformation characteristics was obtained, and the effect of water content on the time-dependent deformation characteristics of the soft soil in the Pearl River Delta was studied. Results show that the obvious time-characteristic of the soft soil and the water content is one of the important factors affecting the time-dependent deformation characteristic of soft soil. The five component Kelvin model and Nishihara Masao model were used to analyze the experimental curves. The fitting and experimental results of the two models under different water content and different stress levels had good consistency, and the fitting effects of the two models were complementary. The nonlinear E-v model of Duncan-Chang model is introduced to improve the fitting effect of Nishihara Masao model at low water content and low load.

Key words: The Pearl River Delta; soft soil; time-dependent deformation; direct shear creep; water content; model analysis

软土是由固体土颗粒、孔隙水、孔隙气和吸附在颗粒群表面的结合水膜及颗粒间胶体等物质组成的多相介质, 广泛分布于沿海、江河的中下游及湖泊的三角洲地区, 其物理力学性质和工程特性较复杂且区域差异性明显。土体时效变形特性是指土体在恒定荷载作用下产生的变形与时间的关系, 包括加载前期的渗流固结变形和加载中后期的时效变形^[1]。土体的时效变形特性是影响地基长期强度和长期变形稳定性的关键因素, 是学

术界和工程界研究的重要课题之一^[2]。

珠江三角洲由于经历复杂的海侵、海退与江水的共同作用, 使得该地区软土在层理特征和物理力学性质上与其它沉积相软土层之间存在一些明显差异特征, 如土层的均匀性极差、平面分布不规则、与粉细砂层呈互层状产出等, 且因沉积时期, 埋藏深度、夹层厚度及分布情况和内容物(部分软土含有牡蛎、贝壳及腐殖质等)的不同, 不同区域又表现有明显的差别, 这使得珠三角软

收稿日期: 2018-02-09

修改稿日期: 2019-03-08

基金项目: 广东省自然科学基金项目(2017A030313293); 广东省教育厅特色创新类项目(2016KTSCX108); 广州市科技计划项目(201801010250)

第一作者: 童华炜(1962—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事地基处理、施工技术方面的研究。E-mail: thw12345678@163.com

土具有承载力低、受荷后变形大、时间效应明显、与建筑物共同作用能力强等特性。这对区域内的工业与民用建筑工程、道路桥梁工程、堤防工程、机场工程等都产生很大影响^[3-4]。

因此,对于深入研究软土的物理力学性能和工程特性,有着积极而重大的经济价值和社会作用。科学研究试验和大量工程经验表明,当土的应力和施加的荷载一定时,土的含水率变化会引起土的时效变形特性变化。软土地区的建筑物建成后的变形一般历时几年甚至长达几十年,可能会产生过大的变形,引起不均匀沉降。不论对短期还是长期活动都会产生较大的影响,这都必须引起人们的高度重视^[5-7]但是由于地域的差异、沉积原因不同、气候水文环境的差别,各地区的软土时效变形特性不尽相同^[1]。

采用改进的直剪蠕变仪,在相同试验条件下完成了 5 组不同含水量及不同应力水平试样时效变形特性的测试;获得了试样含水量与时效变形特性的关系;研究了不同含水量、不同应力水平组合下的模型拟合。基于含水量变化,对珠三角软土室内直剪试验数据进行模型分析,并分析得出相关参量,通过相关系数对比分析各模型的拟合程度。

1 萝岗软土流变试验

1.1 试样制备与试验方案

试验采用广州萝岗软黏土为代表性土样,试

表 1 土样主要物理力学性

Tab. 1 Physico-mechanical characteristics of soils						
试样编号	组成成分	液限 $w_L/\%$	塑限 $w_p/\%$	塑性指数 $I_p/\%$	含水量 $w/\%$	与界限含水量的关系
ZJ1	萝岗软土	57.5	31.2	26.3	8.5	$0.27w_p$
ZJ2					16.4	$0.53w_p$
ZJ3					31.5	w_p
ZJ4					58.1	w_L
ZJ5					70.2	$1.22w_L$

表 2 不同含水量试样的直剪蠕变试验方案

Tab. 2 Direct shear creep test scheme for samples with different water content					
试样编号	固结压力/kPa	水平剪应力大小与级数/kPa			
		1 级	2 级	3 级	4 级
ZJ1	400	24	75	123	156
ZJ2		26	73	126	154
ZJ3		25	73	124	155
ZJ4		16	32	46	63
ZJ5		16	30	44	62

验仪器采用改进后的三联装直剪蠕变仪(见图 1)。根据其界限含水量范围共设计 1 组 5 个试样进行直剪蠕变试验,各试样的含水量 w 依次为 8.5% ($0.27w_p$), 16.4% ($0.53w_p$), 31.5% (w_p), 58.1% (w_L), 70.2% ($1.22w_L$)^[8]。各试样编号、成分及主要物理参数见表 1,因试样的抗剪强度会随着含水量的提高而降低,适当减小了试样 ZJ4 与 ZJ5 的水平剪应力增量,直接剪切蠕变试验方案见表 2。试样制备方法参考《土工试验方法标准》(GB/T50123-1999)。



图 1 改进后的直剪蠕变仪

Fig. 1 Improved direct shear creep apparatus

直剪蠕变稳定的标准为:当施加的剪应力水平较低时,试样通常处于衰减蠕变阶段,24 h 内剪切位移小于 0.005 mm 时可视为蠕变达到稳定,此时可以施加下一级剪切荷载。当施加的剪应力较大,试验可能出现等速蠕变阶段时,待剪切变形速率趋于匀速后,再施加下一级荷载^[9]。

1.2 试验结果分析

所有流体在有相对运动时都要产生内摩擦力,这是流体的一种固有物理属性,称为流体的粘滞性或粘性^[10].在直剪流变试验条件下把土的粘滞系数定义为蠕变曲线图上等速蠕变阶段的剪应力与相应该曲线的剪切速率的比值^[11].

$$\eta = \tau / \dot{\gamma}$$

式中: η 为粘滞系数(Pa·s), τ 为剪应力(Pa), $\dot{\gamma}$ 为剪切速率(s^{-1}).

图 3~图 6 为不同结合水含量试样的剪应变—时间关系曲线,图 7~图 11 为各试样的剪应力—剪应变等时曲线.基于试验结果求得的各试样平均粘滞系数列于表 3 之中.图 12 为平均粘滞系数随含水量变化的关系曲线.

表 3 不同结合水含量试样的平均粘滞系数

Tab. 3 Average viscosity coefficient of samples with different water content

蠕变参数	试样编号				
	ZJ1	ZJ2	ZJ3	ZJ4	ZJ5
$\bar{\eta} / \times 10^4 \text{ GPa} \cdot \text{s}$	18.5	13.9	9.7	16.4	21.3

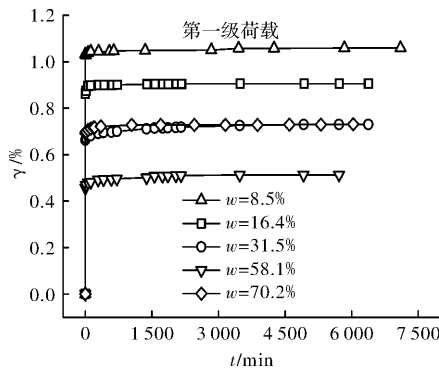


图 3 第一级荷载下不同含水量试样的剪应变—时间关系曲线

Fig. 3 Shear strain time relation curve of samples with different

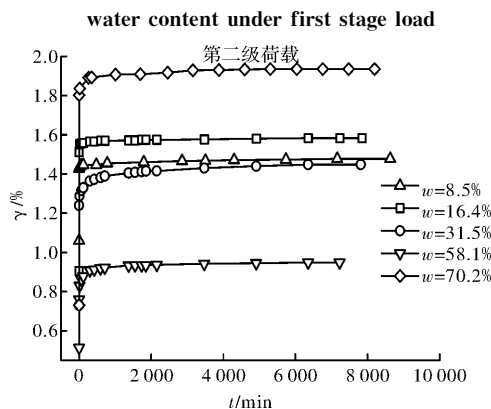


图 4 第二级荷载下不同含水量试样的剪应变—时间关系曲线

Fig. 4 Shear strain time relation curve of samples with different

water content under second stage load

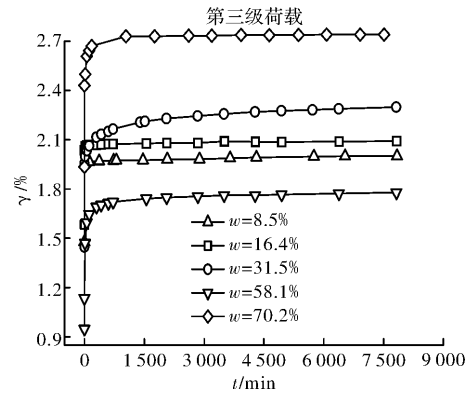


图 5 第三级荷载下不同含水量试样的剪应变—时间关系曲线

Fig. 5 Shear strain time relation curve of samples with different

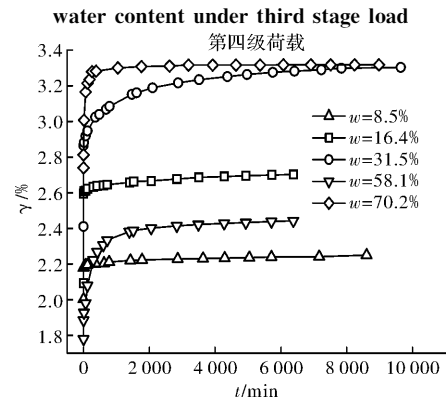


图 6 第四级荷载下不同含水量试样的剪应变—时间关系曲线

Fig. 6 Shear strain time relation curve of samples with different

water content under forth stage load

观察图 3~图 6 可以看出,不同含水量试样的 $\gamma-t$ 曲线均包括各级剪应力作用瞬间产生的瞬时变形和随时间增长的时效变形,并且呈现出不同程度的上凸趋势,保持应力不变的情况下,随着时间的增加,变形也随之增加直至稳定.其中,试样 ZJRB7-1($w=8.5\% = 0.27\omega_p$) 由于其含水量相对较低,颗粒表面粗糙不平且仅存在强结合水,其水膜厚度较薄,在竖向压力作用下颗粒紧密接触,颗粒间范德华力作用比较强,土体变形阻力

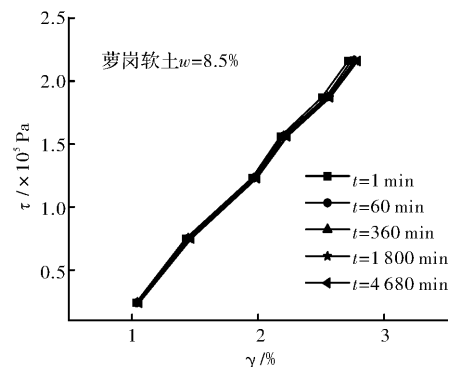


图 7 试样 ZJ1 的剪应力—剪应变等时曲线

Fig. 7 Shear stress shear strain isochronous

curve of sample ZJ1

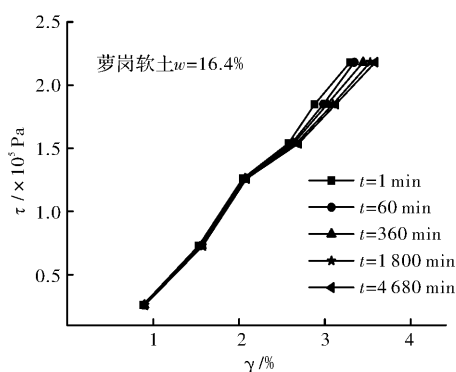


图8 试样 ZJ2 的剪应力—剪应变等时曲线

Fig. 8 Shear stress shear strain isochronous curve of sample ZJ2

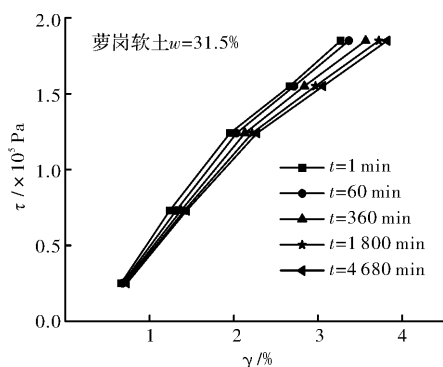


图9 试样 ZJ3 的剪应力—剪应变等时曲线

Fig. 9 Shear stress shear strain isochronous curve of sample ZJ3

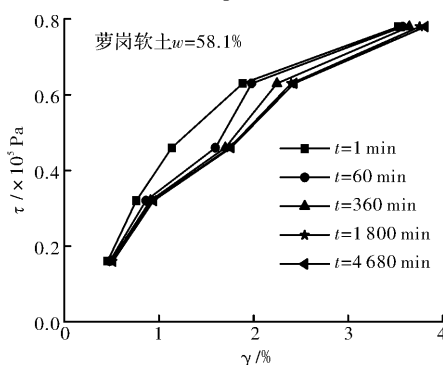


图10 试样 ZJ4 的剪应力—剪应变等时曲线

Fig. 10 Shear stress shear strain isochronous curve of sample ZJ4

较大,在各级剪应力作用瞬间产生瞬时变形后,时效变形曲线接近水平,即时效变形随时间发展不明显,表现为稳定蠕变,同时从图7可以看出,相应的剪应力—剪应变等时曲线在低剪应力水平下重合度较高,在高剪应力水平下不同时刻的曲线簇才开始分开,但分开的幅度也不是十分明显。试样 ZJ2 ($w=16.4\%=0.53w_p$) 的含水量仍低于其最大强结合水含量 ($w_g \approx 0.885w_p = 27.1\%$), 但此时土颗粒表面吸附的强结合水膜较厚,颗粒间的范德华力作用被削弱的

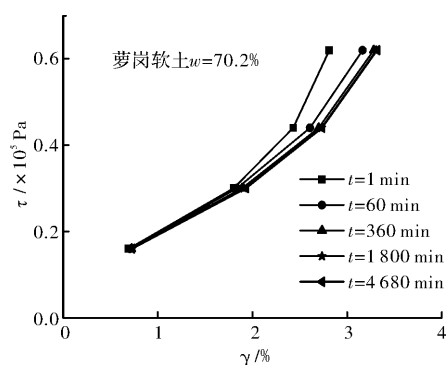


图11 试样 ZJ5 的剪应力—剪应变等时曲线

Fig. 11 Shear stress shear strain isochronous curve

of sample ZJ5

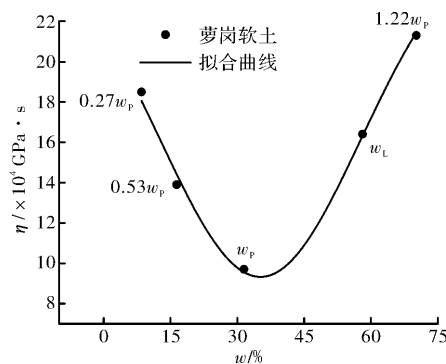


图12 平均粘滞系数与含水量的关系曲线

Fig. 12 The relation curve of average viscosity coefficient and water content

同时,排斥力作用被增强,土体变形阻力较试样 ZJ1 要小,时效变形随时间的增长较为明显,随着剪应力水平的提高,等速蠕变阶段越来越明显

根据表3和图12可知,试样的平均粘滞系数随着含水量的增加呈现出先逐渐降低至某一值后又逐渐增大的趋势。当含水量小于其塑限含水量 ($w \leq w_p$) 时,土体中仅含结合水,其粘滞系数随着含水量的增加逐渐减小,并在塑限含水量附近达到最小值,即随着含水量的增加,土颗粒间的变形阻力在减弱,相应的蠕变速率在增加。当含水量超过其塑限含水量 ($w > w_p$) 时,结合水和自由水同时存在于土体中,其粘滞系数随着含水量的增加逐渐增大,即随着含水量的继续增加,试样时效变形特性有所减弱。

以上充分说明了萝岗软土具有明显的时效变形特性。

2 软土流变模型

一般描述蠕变特性本构模型可分为经验模型和元件模型^[12]。元件模型由胡克弹性体、牛顿粘滞体以及圣维南刚塑体等基本流变元件及其组合体组成,用于描述应力—应变—时间的关系。

根据前文分析, 芟岗软土的典型蠕变曲线主要包括衰减蠕变和等速蠕变阶段, 因此, 分别选取五元件广义 Kelvin 模型和西原正夫模型对其进行分析。

2.1 广义 Kelvin 模型

如图 13 所示, 广义 Kelvin 模型由一个弹簧和两个 Kelvin 体串联而成, 相应的蠕变方程为

$$\gamma(t) = J(t)\tau \quad (1)$$

$$J(t) = \frac{1}{E_H} + \frac{1}{E_{K1}} \left[1 - \exp\left(-\frac{E_{K1}}{\eta_{K1}} t\right) \right] + \frac{1}{E_{K2}} \left[1 - \exp\left(-\frac{E_{K2}}{\eta_{K2}} t\right) \right] \quad (2)$$

式中: E_H 为弹簧的弹性模量, η_{K1} 、 η_{K2} 和 E_{K1} 、 E_{K2} 为 Kelvin 体的粘滞系数和弹性模量, t 为时间, τ 则为相应剪应力。

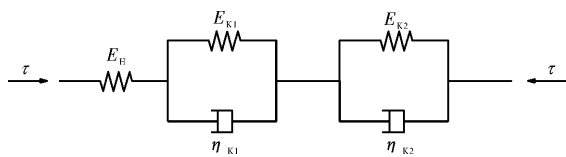


图 13 广义 Kelvin 模型

Fig. 13 Generalized Kelvin model

上述模型中共有 5 个待定参数 E_H 、 η_{K1} 、 η_{K2} 、 E_{K1} 和 E_{K2} , 利用 OriginPro 8 中的 Associate 函数对相应试验数据进行拟合, Associate 函数关系式为

$$y = y_0 + A_1 \left[1 - \exp\left(-\frac{x}{t_1}\right) \right] + A_2 \left[1 - \exp\left(-\frac{x}{t_2}\right) \right] \quad (3)$$

式中, y_0 、 A_1 、 t_1 、 A_2 和 t_2 均为拟合参数。对比式 (1)、(2) 和 (3) 可得:

$$y_0 = \frac{\tau}{E_H}, A_1 = \frac{\tau}{E_{K1}}, A_2 = \frac{\tau}{E_{K2}}, -\frac{1}{t_1} = -\frac{E_{K1}}{\eta_{K1}}, -\frac{1}{t_2} = -\frac{E_{K2}}{\eta_{K2}}$$

表 4 各组含水量试样的直剪蠕变试验方案

Tab. 4 Direct shear creep test scheme for samples with different water content

试样编号	固结压力/kPa	水平剪应力大小与级数/kPa			
		1 级	2 级	3 级	4 级
ZJ1	400				
ZJ2		25	74	125	155
ZJ3					
ZJ4		16	31	45	62
ZJ5					

进行相应转换, 则

$$E_H = \frac{\tau}{y_0}, E_{K1} = \frac{\tau}{A_1}, E_{K2} = \frac{\tau}{A_2}, \eta_{K1} = \frac{t_1}{A_1},$$

$$\eta_{K2} = \frac{t_2}{A_2}.$$

2.2 西原正夫模型

如图 14 所示, 西原正夫模型是由 Kelvin 模型与 Bingham 模型串联得到的, 其本构方程为

$$\gamma = \tau \left\{ \frac{1}{E_H} + \frac{1}{E_{K1}} \left[1 - \exp\left(-\frac{E_{K1}}{\eta_{K1}} t\right) \right] \right\}, \quad \tau < \tau_s \quad (4)$$

$$\gamma = \tau \left\{ \frac{1}{E_H} + \frac{1}{E_{K1}} \left[1 - \exp\left(-\frac{E_{K1}}{\eta_{K1}} t\right) \right] \right\} + \frac{\tau - \tau_s}{\eta_{K2}} t, \quad \tau > \tau_s \quad (5)$$

式中, E_H 为弹簧的弹性模量, η_{K1} 和 E_{K1} 为 Kelvin 体的粘滞系数和弹性模量, η_{K2} 和 τ_s 为 Bingham 模型中的粘滞系数和摩擦阻力, t 为时间, 则为相应剪应力。

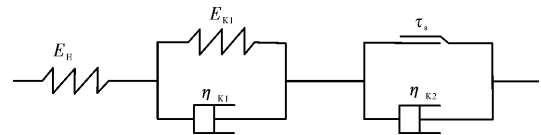


图 14 西原正夫模型

Fig. 14 Nishihara Masao model

上述模型中共有 5 个待定参数 E_H 、 η_{K1} 、 η_{K2} 、 E_{K1} 和 τ_s , 可利用 OriginPro 8 中的自定义函数进行拟合。因为含水量为 8.5%、16.4%、31.5% 的试样各级应力值基本相同, 故为减少自定义函数的数量, 在定义函数时将含水量 8.5%、16.4%、31.5% 的试样在各级应力下的值取为相同的。同理 58.1%、70.2% 为一组。各组合含水量试样直剪蠕变方案具体见表 4。相应拟合结果如表 5、表 6 所示。

表 5 五元件广义 Kelvin 模型中各组合对应的模型参数表

Tab. 5 Parameters table of each combination in the five element generalized Kelvin model

$\omega / \%$	τ / 10^5 Pa	E_H / 10^5 Pa	E_{K1} / 10^5 Pa	η_{K1} / 10^5 Pa · min	E_{K2} / 10^5 Pa	η_{K2} / 10^5 Pa · min	相关系数 r
8.50	0.24	1.61E+12	10.926	10.926	45.790	45.790	0.999
	0.75	70.772	149.974	149.974	375.075	375.075	0.977
	1.23	83.257	170.165	170.165	489.669	489.669	0.986
	1.56	77.912	48 013 13.8	20.438	2 879.823	844.202	0.991
16.40	0.26	2 024.922	5.674	5.674	58.901	58.901	0.996
	0.73	80.618	91.387	91.387	219.410	219.410	0.996
	1.26	79.597	206.547	206.547	509.564	509.564	0.992
	1.54	73.601	5.857	5.857	547.926	547.926	0.923
31.5	0.25	6.6 8E+07	25.563	25.563	70.689	70.689	0.985
	0.73	99.966	150.091	150.091	220.771	220.771	0.904
	1.24	85.641	355 106.80	5.791	459.651	224.179	0.987
	1.55	64.319	585 395.29	131.587	419.010	308.556	0.994
58.10	0.16	914.808	7.630	7.630	66.932	66.932	0.973
	0.32	62.337	167.432	167.432	158.118	158.118	0.882
	0.46	48.451	204.404	518.445	86.364	170.427	0.989
	0.63	34.129	291 316.45	24 041.87	287.343	170.639	0.987
70.20	0.16	1.43E+16	0.988	0.988	44.474	44.474	0.994
	0.3	40.067	5.106	5.106	51.698	51.698	0.977
	0.44	22.737	2.678	2.678	118.092	118.092	0.723
	0.62	22.445	53 842.442	2 610.947	304.848	178.135	0.996

表 6 西原正夫模型中各组合对应的模型参数表

Tab. 6 Parameters table of each combination in the Nishihara Masao model

$\omega / \%$	τ / 10^5 Pa	E_H / 10^5 Pa	E_{K1} / 10^5 Pa	η_{K1} / 10^5 Pa · min	E_{K2} / 10^5 Pa	η_{K2} / 10^5 Pa · min	相关系数 r
8.50	0.24	0.019	0.021	0.000	0.620	0.250	0.569
	0.75	0.009	0.026	0.009	0.746	0.740	0.996
	1.23	0.007	0.020	0.006	1.052	1.239	0.999
	1.56	0.005	0.050	0.023	0.010	1.550	0.976
16.40	0.26	8 250.829	0.011	0.003	1.723	0.250	0.999
	0.73	0.011	0.015	0.006	1.289	0.740	0.999
	1.26	0.006	0.021	0.008	1.206	1.239	0.998
	1.54	0.005	0.019	0.007	0.693	1.549	0.993
31.50	0.25	4 465.118	0.014	0.005	0.881	0.250	0.996
	0.73	0.014	0.016	0.010	0.587	0.739	0.962
	1.24	0.007	0.015	0.010	0.039	1.240	0.927
	1.55	0.004	0.025	1.501	0.000	1.550	0.797
58.10	0.16	5 896.656	0.020	0.008	0.815	0.160	0.994
	0.32	0.019	0.026	0.025	52.986	0.294	0.934
	0.46	0.005	0.019	0.348	1.960	0.449	0.753
	0.63	0.005	0.020	4.685	0.000	0.620	0.984
70.20	0.16	7 518.458	0.014	0.004	1.220	0.160	0.998
	0.3	0.014	0.009	0.003	0.926	0.310	0.996
	0.44	0.010	0.015	0.194	4.346	0.447	0.965
	0.62	0.004	0.020	0.701	3.209	0.618	0.975

3 理论模型拟合分析与评价

观察表5可以看出,五元件广义 Kelvin 模型在各含水量各荷载组合下的拟合程度都较高;当含水量为 8.5% 时,各应力水平下拟合程度都较高,相关系数在 0.94~0.99 之间;在 16.4%、31.5%、58.1%、70.2% 含水量下都有一个拟合程度较差的组合,且随着含水量的升高,相关系数由 0.92、0.90、0.88 至 0.72 递减。

观察表6可以看出,西原正夫模型在各含水量各荷载组合下的拟合程度较高,但在第一级荷载,8.5% 含水量的组合下拟合较差,相关系数仅为 0.56,拟引入邓肯-张模型非线性 E-v 模型尝试对西原正夫模型进行修正。

对比表5和表6可知,两个模型有较好的互补性。五元件广义 Kelvin 模型拟合较差时,西原正夫模型在对应的组合下的拟合程度都较高,相关系数在 0.93~0.99 之间。而西原正夫模型拟合较差的组合,五元件广义 Kelvin 模型拟合的相关系数在 0.98~0.99 之间。

如图15~图22所示,五元件广义 Kelvin 模型的拟合曲线在各组合下的弹性变形阶段和衰减蠕变阶段都能准确的描述,但随着时间的增加,只有在第四级荷载下的 ZJ4(58.1%)、ZJ5(70.2%) 试验依旧能很好的拟合,其余试样在各级荷载下,拟合曲线的最终变形都低于实际的试验结果;ZJ2(16.4%)、ZJ4(58.1%)、ZJ5(70.2%) 试样在各级荷载作用下的试验结果用西原正夫模型拟合在各个阶段都能准确的描述,ZJ1(8.5%) 用西原正夫模型进行拟合,在较高应力时拟合效果较理想,而第一级荷载时拟合效果不理想,弹性阶段小于实际的试验结果,而最终变形则过大,ZJ3(31.5%) 在各级荷载的拟合效果都较好,但随着

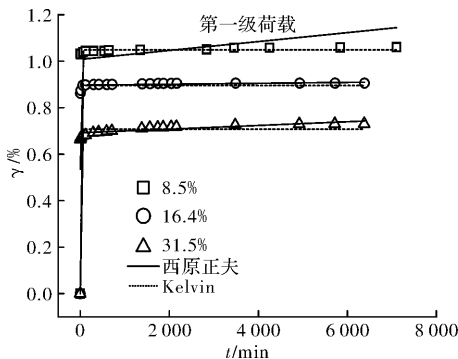


图15 第一级荷载、各含水量不同模型拟合对比
Fig. 15 The first load, each water content of different models fitting comparison

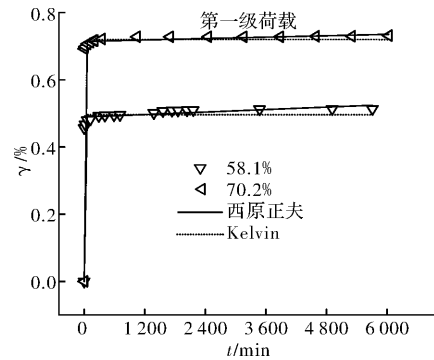


图16 第一级荷载、各含水量不同模型拟合对比
Fig. 16 The first load, each water content of different models fitting comparison

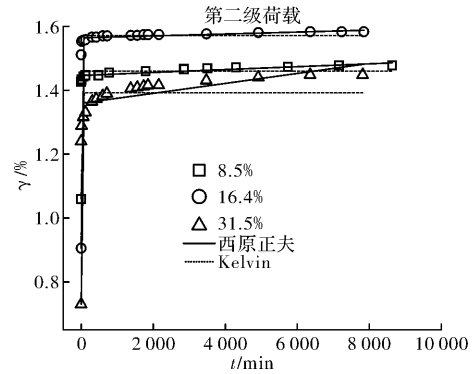


图17 第二级荷载、各含水量不同模型拟合对比
Fig. 17 The second load, each water content of different models fitting comparison

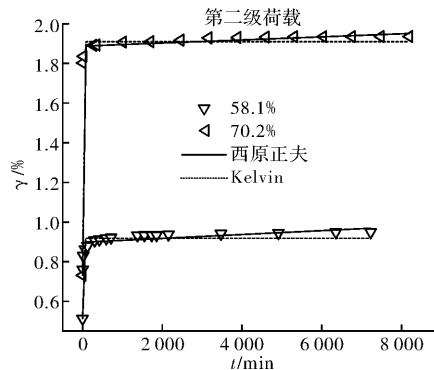


图18 第二级荷载、各含水量不同模型拟合对比
Fig. 18 The second load, each water content of different models fitting comparison

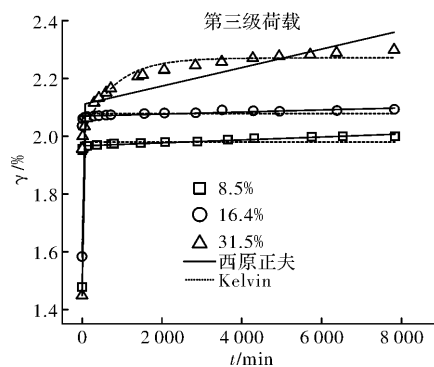


图19 第三级荷载、各含水量不同模型拟合对比
Fig. 19 The third load, each water content of different models fitting comparison

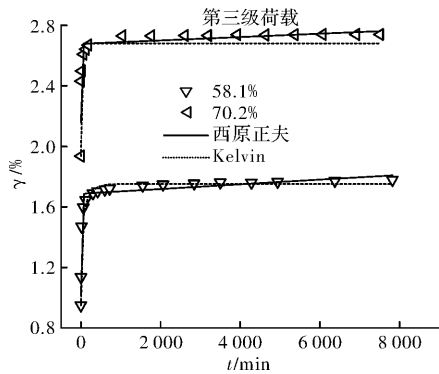


图 20 第三级荷载、各含水量不同模型拟合对比
Fig. 20 The third load, each water content of different models fitting comparison

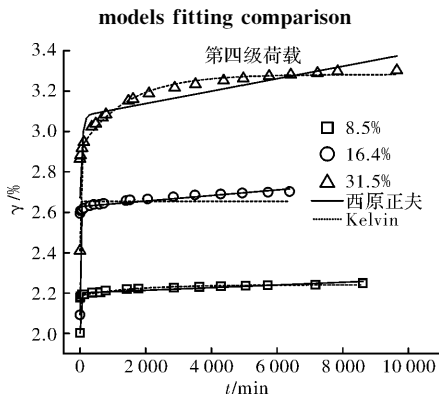


图 21 第四级荷载、各含水量不同模型拟合对比
Fig. 21 The forth load, each water content of different models fitting comparison

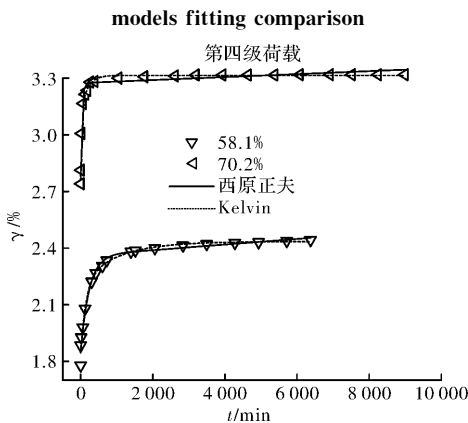


图 22 第四级荷载、各含水量不同模型拟合对比
Fig. 22 The forth load, each water content of different models fitting comparison

应力的增加, 拟合曲线在弹性变形阶段高于实际试验结果, 衰减蠕变阶段则较小, 最终变形则较大。

4 引入邓肯-张非线性模型

元件模型所采用的 Hook 体、Newton 体、St. Venant 体等基本元件是线性的, 所以无论如何串并联得到多复杂的模型, 模型所描述的总是线性粘弹性。而软土是非线性流变物质, 考虑加载瞬时的非线性变形, 引入邓肯-张的非线性弹性模量 $E_t = Kp_a \left(\frac{\sigma}{p_a}\right)^n$ 代替西原正夫模型中的 E_H ,

进行数值模拟时简化为 $E_t = a \left(\frac{\sigma}{b}\right)^n$ 。

其本构方程为

$$\gamma = \tau \left\{ \frac{1}{a \left(\frac{\sigma}{b}\right)^n} + \frac{1}{E_{K1}} \left[1 - \exp\left(-\frac{E_{K1}}{\eta_{K1}} t\right) \right] \right\}, \quad \tau < \tau_s, \tag{6}$$

$$\gamma = \tau \left\{ \frac{1}{a \left(\frac{\sigma}{b}\right)^n} + \frac{1}{E_{K1}} \left[1 - \exp\left(-\frac{E_{K1}}{\eta_{K1}} t\right) \right] \right\} + \frac{\tau - \tau_s}{\eta_{K2}}, \quad \tau > \tau_s, \tag{7}$$

式中: a, b, n 为邓肯-张模型参数, σ 为竖向应力, η_{K1} 和 E_{K2} 为 Kelvin 体的粘滞系数和弹性模量, η_{K2} 和 τ_s 为 Bingham 模型中的粘滞系数和摩擦阻力, t 为时间, τ 则为相应剪应力。

以含水量为 8.5%、第一级荷载的试样为例, 根据修正后的模型和本构方程对蠕变试验曲线进行拟合, 并与线性的西原正夫模型进行对比, 如图 23 所示, 具体拟合参数见表 7。

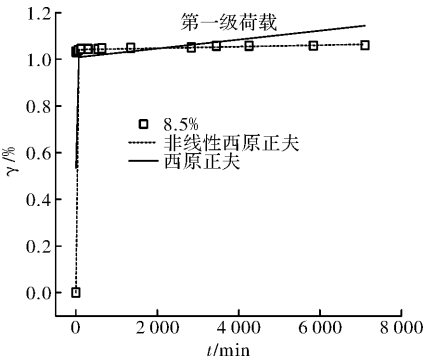


图 23 线性与非线性西原正夫模型拟合对比图
Fig. 23 Contrast diagram of linear and nonlinear Nishihara Masao model

表 7 非线性西原正夫模型参数表

Tab. 7 Parameters table of each combination in the nonlinear Nishihara Masao model

ω	τ / 10^5 Pa	a	b	n	E_{K1} / 10^5 Pa	η_{K1} / 10^5 Pa · min	η_{K2} / 10^5 Pa · min	τ_s / 10^5 Pa	相关系数 r
8.5%	0.24	8.58	1.57E+05	1	0.96 055	0.20 067	139.24 863	24.98 868	0.99 956

修正后的模型拟合与试验结果具有良好的一致性,在各个阶段都能较准确的描述软土的时效变形,相关系数由线性的 0.56 变为 0.99,远优于线性的西原正夫模型。可见基于邓肯-张非线性弹性的西原正夫模型可用于描述低应力水平、低含水量状态的软土时效变形特性。

5 结论

(1)不同含水量的珠三角软土直剪蠕变试验结果表明,珠三角软土具有明显的变形时效性,且含水量对软土时效变形特性产生重要影响,随着含水量的增加,软土的蠕变达到稳定时的变形增大。由于结合水膜厚度变化引起的颗粒间范德华力和排斥力主导地位的交替和自由水对颗粒间错动滑移和摩擦作用的影响,试样的平均粘滞系数随着含水量的增加呈现出先逐渐减少至某一值后又逐渐增大的趋势。

(2)五元件 Kelvin 模型与西原正夫模型都能较好的描述大多数含水量和应力水平组合下的软土时效变形特性。两者有良好的互补性,相结合可以更合理地描述软土时效变形曲线进行拟合。

(3)基于邓肯-张非线性弹性的西原正夫模型可以更合理地描述低应力低含水量下的软土时效变形特性。

参考文献 References

- [1] 孙钧. 岩土材料流变及其工程应用[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1999:3-4.
SUN Jun. Rheology and engineering application of geotechnical materials [M]. Beijing: China Construction Industry Press,1999:3-4.
- [2] 赵明华,肖燕,陈昌富. 软土流变特性的室内试验改进的西原模型[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2004,31(1):48-52.
ZHAO Minghua, XIAO Yan, CHEN Changfu. Laboratory test and improved Xiyuan model for rheological properties of soft soil [J]. Journal of Hunan University(Natural Science Edition), 2004, 31 (1): 48-52.
- [3] 赖玉明. 珠江三角洲海陆交互相沉积软土特性浅析[J]. 西部探矿工程,2006(7):169-172.
LAI Yuming. Preliminary analysis of the characteristics of marine-terrestrial sedimentary soft soil in the Pearl River Delta [J]. Western Prospecting Project, 2006(7): 169-172.
- [4] 周晖. 珠江三角洲软土分布特征及成因的地质与水文环境分析[J]. 广东土木与建筑,2014(7):36-38.
ZHOU Hui. Geological and hydrological environment analysis of soft soil distribution characteristics and cau-

- ses in the Pearl River delta [J]. Civil and Architecture of Guangdong, 2014(7): 36-38.
- [5] 王元战,王婷婷,王军. 滨海软土非线性流变模型及其工程应用研究[J]. 岩土力学,2009,39(9):2679-2683.
WANG Yuanzhan, WANG Tingting, WANG Jun. Nonlinear rheological model of coastal soft soil and its engineering application [J]. Geotechnical Mechanics, 2009,39(9): 2679-2683.
- [6] 王志亮,黄景忠,杨夏红. 考虑软土流变特性的沉降预测模型研究[J]岩土力学,2006,27(9):1567-1570.
WANG Zhiliang, HUANG Jingzhong, YANG Xiaohong. Settlement prediction model considering rheological properties of soft soil [J] Geotechnical Mechanics, 2006, 27 (9): 1567-1570.
- [7] 周德培. 流变学原理及其在工程中的应用[M]. 成都:西南交通大学出版社,1995.
ZHOU Depei. Rheological principle and its application in engineering [M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 1995.
- [8] 袁杰. 流变相物质对软土流变特性影响实验与分析[D]. 广州:华南理工大学,2014.
YUAN Jie. Experiments and analysis of rheological properties of soft soil affected by rheological phase materials [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2014.
- [9] 胡桂衔,房营光,袁杰. 砂性土的蠕变性质影响试验研究[J],工程勘察:2012(12):8-11.
HU Guibian, FANG Yingguang, YUAN Jie. Experimental study on creep properties of sandy soil [J], Engineering Investigation; 2012 (12): 8-11.
- [10] 赵建会,刘浪. 基于坍塌度的充填膏体流变特性研究[J],西安建筑科技大学学报(自然科学版),2015,26(2):192-198.
ZHAO Jianhui, LIU Lang. Rheological properties of filling paste based on slump[J]. J. of Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2015, 26 (2): 192-198.
- [11] 何俊,肖树芳. 结合水对海积软土流变性质的影响[J]. 吉林大学学报:地球科学版,2003,33(2):204-207.
HE Jun, XIAO Shufang. Combined with the effect of water on rheological properties of marine soft soil [J]. Journal of Jilin University: Geoscience Edition, 2003, 33 (2): 204-207.
- [12] 袁静,龚晓南,益德清. 岩土流变模型的比较研究[J]. 岩石力学与工程学报,2001,20(6):772-779.
YUAN Jing, GONG Xiaonan, YI Deqing. A comparative study of georheological models [J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20 (6): 772-779.

(编辑 沈波)