

· 地基与基础 ·



基于归一化广义 Kelvin 模型参数辨识研究*

岳长喜^{1,2,3,4,5}, 潘伟², 曹永华^{1,2,3,4,5}, 于长一^{1,2,3,4,5}, 陈举^{1,2,3,4,5}

(1. 中交天津港湾工程研究院有限公司, 天津 300222; 2. 中交第一航务工程局有限公司, 天津 300461;

3. 港口岩土工程技术交通行业重点实验室, 天津 300222; 4. 天津市港口岩土工程技术重点实验室, 天津 300222;

5. 中交集团岩土工程重点实验室, 天津 300222)

摘要: 元件模型计算软土蠕变时, 在不同的固结压力下, 模型参数表现出显著的差异性, 对土体物理指标及应力状态具有高度敏感性, 计算时需要大量的参数校准和多次迭代调整, 难以直接应用于工程。针对上述问题, 以某填海工程为研究对象, 通过一维固结蠕变试验, 研究不同埋深软土的蠕变特性, 并采用广义 Kelvin 模型对蠕变试验曲线进行拟合, 通过归一化分析, 提出模型中 5 个参数的经验公式。结果表明, 归一化 Kelvin 模型具有参数简单、适用性强的特点, 各参数可通过固结荷载、重力密度、孔隙比、液限孔隙比以及埋深等指标拟合; 该模型与 Burgers 模型、Singh-Mitchell 模型相比, 能更好地拟合试验数据, 相关系数可达 0.98 以上; 与实际工程监测结果相比, 该模型能够较好地反映和预测深厚软基的蠕变规律。

关键词: 软土蠕变; 归一化; 广义 Kelvin 模型; 沉降预测

中图分类号: U655.54

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)08-0209-07

Parameter identification based on normalized generalized Kelvin model

YUE Changxi^{1,2,3,4,5}, PAN Wei², CAO Yonghua^{1,2,3,4,5}, YU Changyi^{1,2,3,4,5}, CHEN Ju^{1,2,3,4,5}

(1. Tianjin Port Engineering Institute Co., Ltd. of CCCC First Harbor Engineering Co., Ltd., Tianjin 300222, China;

2. CCCC First Harbor Engineering Co., Ltd., Tianjin 300461, China;

3. Key Laboratory of Port Geotechnical Engineering of the Ministry of Communication, Tianjin 300222, China;

4. Key Laboratory of Port Geotechnical Engineering of Tianjin, Tianjin 300222, China;

5. Key Laboratory of Geotechnical Engineering of CCCC, Tianjin 300222, China)

Abstract: In the calculation of creep in soft clay using element models, model parameters exhibit significant variability under different consolidation pressures and show high sensitivity to soil physical indices and stress states. This necessitates extensive parameter calibration and multiple iterative adjustments, making direct application in engineering with difficulty. To address these issues, we focus on a sea reclamation project to investigate the creep characteristics of soft clay at varying depths through one-dimensional consolidation creep tests. Then we employ the generalized Kelvin model to fit the creep test curves, and carry out a normalization analysis to propose empirical formulas for five parameters within the model. The results show that the normalized Kelvin model features simplicity in parameters and strong applicability. The parameters can be fitted using indices such as consolidation load, gravity density, void ratio, liquid limit void ratio, and depth. Compared with the Burgers model and the Singh-Mitchell model, the Kelvin model better fits the experimental data, with correlation coefficients exceeding 0.98. Compared with actual engineering monitoring results, this model can effectively reflect and predict the creep behavior of deep soft foundations.

Keywords: soft soil creep; normalization; generalized Kelvin model; settlement prediction

收稿日期: 2024-10-22

*基金项目: 中国交通建设股份有限公司科技项目(2023-ZJKJ-03); 中交第一航务工程局有限公司科技项目(2022-YHJJBG04)

作者简介: 岳长喜(1990—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事软土地基加固和跨海通道领域的研究。

软土地基的工作性能可采用稳定和变形两方面的指标进行控制。稳定问题可通过极限平衡理论计算解决；地基的变形问题则比稳定问题更复杂，特别是软土地基，不仅压缩性高、变形大，而且渗透性差、变形的历时长，因而对地基工作性能的影响非常大。对于软土地基变形特性的研究虽然起步较早，取得了许多有价值的成果，但还有不少尚待解决和需要进一步研究的问题。软土的变形主要分为瞬时沉降、固结沉降和次固结沉降(也称蠕变沉降)。瞬时沉降可以用弹性力学解决，比较复杂的是固结沉降与次固结沉降。固结沉降可用固结理论解决，其机理都比较明确，对一般土体也有较为成熟的计算方法，但对软土而言，其固结沉降计算方法仍然需要提高。很多研究^[1-5]表明，软土的固结参数会随固结过程而发生改变。对固结过程中土性指标的变化规律，不同的研究给出不同的结果，这些结果均基于不同的手段得到，有的基于室内试验，有的基于现场数据。因此，这些结果的差异性较大，有的甚至连变化的趋势都是相反的，这无疑加大了现实工程中选择合理的土性参数的难度。

软土沉降计算中，最难、最复杂的是蠕变沉降计算，对其机理和计算分析方法的研究也最多^[6-9]。蠕变沉降非常复杂，对其认识也有一个渐进的过程，包括土力学鼻祖太沙基也曾认为次固结沉降只持续某一限定的时间，但后来维也纳科技大学一个长达42年的试验证明，蠕变会一直持续。对于复杂工程的蠕变沉降多采用数值计算，以适应更复杂的地质条件和荷载条件。目前蠕变模型主要包括4种：经验模型、元件模型、屈服面模型和半经验半理论模型^[10-15]；其中，元件模型因物理意义明确应用最为广泛。但元件模型的参数对土体物理指标及应力状态具有高度敏感性，在不同的固结压力下，模型参数表现出显著的差异性。一方面，在进行土体沉降的数值模拟时，如果仅采用某一特定应力状态下的参数计算整个

沉降过程，则难以准确捕捉土体在不同应力条件下的复杂非线性行为；另一方面，为了提高模拟的准确性，采用不同应力状态的多组参数计算，需要大量的参数校准和多次迭代调整，难以直接应用于工程。

本文通过单轴蠕变试验分析软土蠕变特性，并在五元件广义 Kelvin 模型的基础上，提出一种综合考虑土体固结荷载、重力密度、孔隙比、液限孔隙比以及埋深等指标的归一化蠕变模型，通过有限元软件子程序二次开发，分析某填海工程的长期沉降，从而验证归一化蠕变模型及建立的数值模型的可靠性。

1 蠕变试验及结果分析

土体试样取自某填海工程，取土深度为地面以下0.5~60.0 m，采用薄壁取土器回转取样，经常规室内土工试验测定，其物理参数见表1。

对上述土样进行单轴蠕变试验，试验加载等级为25、50、80、100、200、250、400、800 kPa。每级荷载下试样变形量在24 h内小于0.005 mm时，认为土体处于稳定蠕变阶段。当蠕变达到稳定条件后方可施加下级荷载，试验总时间不少于100 d。

限于篇幅，以A₁和A₅土样的试验结果为例进行分析，蠕变时程曲线见图1。各级荷载施加完成后，蠕变曲线斜率逐渐减小，表现出减速蠕变的特征，且随荷载 σ 增大，衰减蠕变阶段产生的应变 ϵ 也越大，历时越久。在初始施加荷载为25 kPa时，软土发生瞬间变形后，其变形随时间缓慢增长，且在较短时间内达到稳定状态并保持恒定；当施加荷载为50、80、100、200、250、400和800 kPa时，表现为衰减稳定型蠕变，随着施加荷载等级的提高，衰减蠕变阶段持续时间越长，在同一深度的不同荷载水平下，蠕变曲线斜率基本一致，最终趋于稳定，土体蠕变进入稳定蠕变阶段。

表 1 土样物理参数
Tab. 1 Physical parameters of soil samples

土样	土样深度 h/m	含水率 $w/\%$	湿密度 $\rho/(kg \cdot m^{-3})$	饱和度 $S_r/\%$	孔隙比 e	液限 $w_L/\%$
A ₁	3.5~4.0	70.3	1 560	96.4	2.013	56.2
A ₂	4.5~5.0	62.7	1 610	96.7	1.789	57.8
A ₃	5.5~6.0	63.6	1 610	97.3	1.805	50.8
A ₄	7.5~8.0	65.4	1 600	97.4	1.853	56.9
A ₅	8.5~9.0	50.3	1 710	97.4	1.426	47.8
A ₆	9.5~10.0	35.4	1 830	94.8	1.020	38.5
A ₇	14.5~15.0	46.9	1 730	96.6	1.335	44.6
A ₈	15.5~16.0	49.5	1 710	96.9	1.404	46.8
A ₉	16.5~17.0	55.6	1 660	96.7	1.587	53.3
A ₁₀	17.5~18.0	59.4	1 630	96.7	1.689	53.8
A ₁₁	18.5~19.0	60.3	1 620	96.1	1.731	56.5
A ₁₂	19.5~19.7	65.4	1 610	98.3	1.835	64.2
A ₁₃	20.2~20.4	60.4	1 620	96.2	1.733	59.7
A ₁₄	20.8~21.0	61.0	1 620	96.6	1.743	60.6
A ₁₅	21.8~22.0	62.3	1 610	96.5	1.782	55.7
A ₁₆	22.8~23.0	45.1	1 770	98.6	1.263	53.5
A ₁₇	24.5~24.7	36.5	1 840	96.2	1.048	41.5

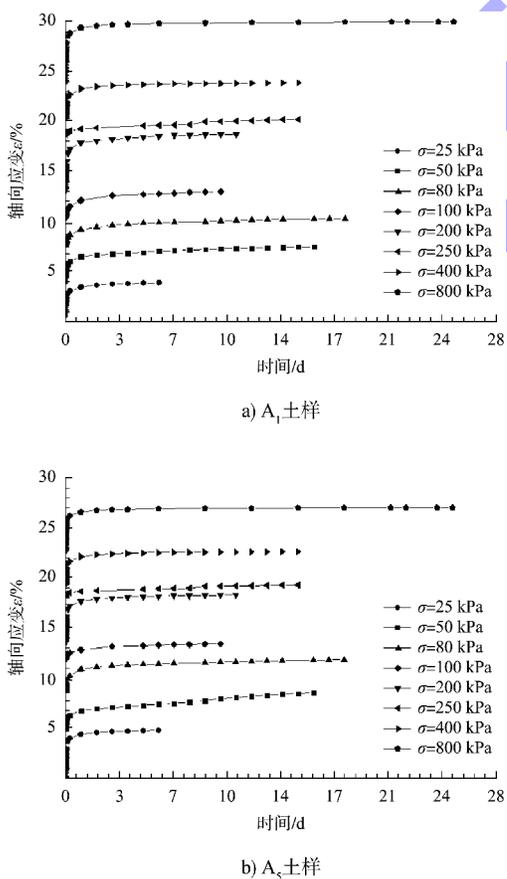


图 1 单轴蠕变试验竖向应变时程曲线
Fig. 1 Time history curve of vertical strain in uniaxial creep test

2 蠕变本构模型及参数辨识

2.1 蠕变模型

为描述土体瞬弹性和黏弹性特性, 表征蠕变的衰减稳定性特征, 本文采用五元件广义的 Kelvin 模型拟合不同等级荷载下蠕变特性。五元件广义的 Kelvin 模型由一个 Kelvin 模型和 Merchant 模型串联而成, 模型见图 2。模型蠕变方程见式(1)、(2)。

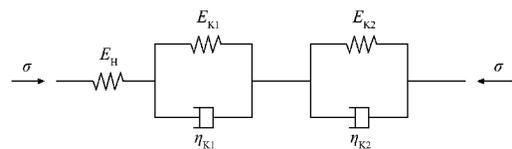


图 2 五元件 Kelvin 模型
Fig. 2 Five-element Kelvin model

$$\varepsilon(t) = J(t) \sigma \tag{1}$$

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

式中: ε 为应变; J 为蠕变柔量, kPa^{-1} ; σ 为应力, kPa ; t 为时间, min ; E_H 为胡克体的弹性模量, kPa ; η_{K1} 、 η_{K2} 为 Kelvin 体的黏滞系数, $kPa \cdot min$; E_{K1} 、 E_{K2} 为 Kelvin 体的弹性模量, kPa 。

通过式(1)、(2)对 $A_1 \sim A_{17}$ 土样蠕变试验结果进行拟合, 可得到模型中 E_H 、 E_{K1} 、 E_{K2} 、 η_{K1} 和 η_{K2} 等参数, 限于篇幅, 仍以 A_1 和 A_5 土样为例, 拟合曲线见图 3, E_H 、 E_{K1} 、 E_{K2} 、 η_{K1} 和 η_{K2} 参数见表 2。由拟合结果可知, 五元件广义 Kelvin 模型能够很好地拟合出软土在低荷载下的稳定蠕变发

展过程, 同时也能反映软土在高荷载下衰减蠕变阶段历时较长的特性。总体上, 五元件广义 Kelvin 模型在各级荷载作用下的拟合度均在 0.99 左右, 该模型的拟合曲线均能较好地与试验值相符合, 能够较准确地描述软土的蠕变特性。

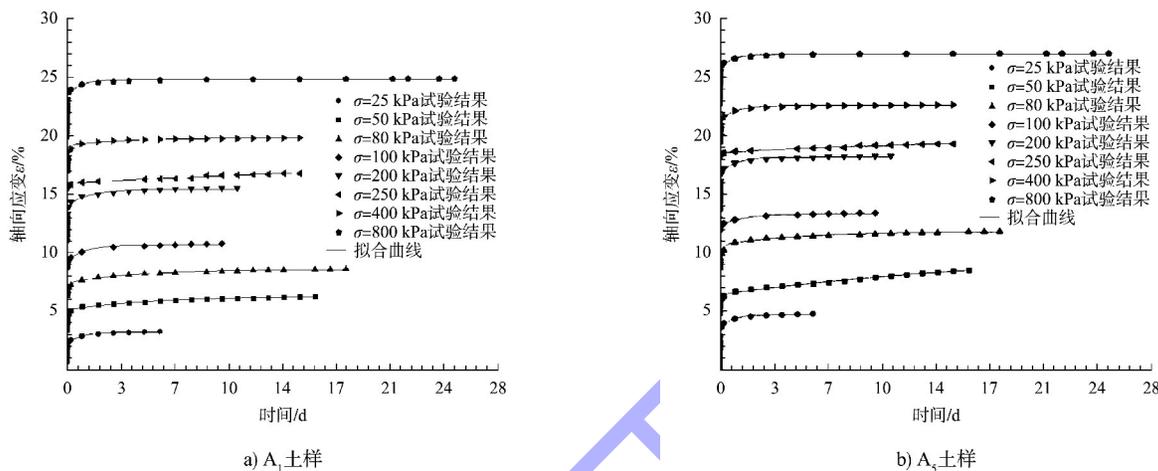


图 3 蠕变拟合曲线
Fig. 3 Creep fitting curve

表 2 蠕变模型参数
Tab. 2 Creep model parameters

土样	固结压力/kPa	E_H /MPa	E_{K1} /MPa	E_{K2} /MPa	η_{K1} /(GPa·min)	η_{K2} /(GPa·min)	R^2
A_1	25	3.602	2.497	1.656	3.314	0.074	0.995
	50	1.424	4.227	3.187	32.550	0.294	0.995
	80	1.245	6.920	8.290	45.040	1.835	0.994
	100	1.152	6.752	20.040	10.840	0.607	0.997
	200	1.795	13.420	7.092	27.550	0.382	0.997
	250	1.900	10.600	12.700	68.900	2.810	0.998
	400	1.300	16.600	48.000	38.700	2.960	0.993
	800	2.420	18.100	9.570	37.200	0.515	0.989
A_5	25	9.094	2.086	0.777	2.378	0.042	0.991
	50	1.006	1.249	3.439	39.560	0.342	0.992
	80	0.909	6.950	4.403	50.290	0.951	0.993
	100	0.841	9.662	26.600	21.430	0.690	0.998
	200	1.460	13.820	6.664	20.330	0.346	0.994
	250	1.390	10.600	6.740	76.900	1.450	0.998
	400	2.370	7.970	25.700	14.900	0.745	0.990
	800	1.970	18.700	9.000	27.400	0.466	0.989

2.2 归一化参数辨识

采用广义 Kelvin 模型对土体蠕变特性进行拟合, 模型的 5 个参数应随着土体应力状态的变化而变化, 即 $A_1 \sim A_{17}$ 土样在每级荷载下均有 5 个参

数, 17 组试验在 25、50、80、100、200、250、400 和 800 kPa 荷载下共有 680 个蠕变参数。当采用该模型计算蠕变时, 在不同的应力水平下需要采用相应的蠕变参数, 在工程应用时十分繁琐。

由表 2 可知, 蠕变参数与应力水平有关, 通过建立 5 个蠕变参数随荷载变化的关系即可由荷载反算蠕变参数, 从而减少沉降分析时在不同应力水平下的参数录入。

首先对 E_H 进行无量纲化, 得到 E_H/σ , 引入土体埋深 h 、天然孔隙比 e 、液限孔隙比 e_L 、重力密度 γ 以及大气压强 p , 建立 E_H/σ 与 $\beta = \sigma \cdot (1+e/e_L) / \{p[1+\exp(1-6\gamma^{-1}h^{-1})]\}$ 关系见式(3), 相关度为 0.998。

$$E_H = \sigma [6.28 + 94.81 \exp(0.0115 - \beta/0.45) + 5482.44 \exp(0.1242 - \beta/0.042)] \quad (3)$$

同理, 可建立 E_{K1} 、 E_{K2} 、 η_{K1} 和 η_{K2} 与 h 、 γ 以及 E_H 的关系见式(4)~(7), 相关度均在 0.970 以上。

$$E_{K1} = \gamma h \left\{ 20.643 + \frac{770.11}{1 + \exp[E_H / (0.615\sigma) - 11.92]} \right\} \quad (4)$$

$$\frac{E_H}{E_{K2}} = 0.3066 \left(\frac{E_H}{E_{K1}} \right)^4 - 2.0157 \left(\frac{E_H}{E_{K1}} \right)^3 + 3.6888 \cdot \left(\frac{E_H}{E_{K1}} \right)^2 - 0.7871 \left(\frac{E_H}{E_{K1}} \right) + 0.2145 \quad (5)$$

$$\eta_{K1} = \frac{E_H}{7.729 + 0.01884 \exp[-28.1655\sigma / (\gamma h)]} \quad (6)$$

$$\eta_{K2} = \frac{E_H}{0.00334 + 0.97165 \exp[-21.49215\sigma / (\gamma h)]} \quad (7)$$

式(1)~(7)构成了归一化广义 Kelvin 蠕变模型。为验证本文提出模型的可靠性, 分别采用本文模型、Burgers 模型以及 Singh-Mitchell 模型对 A_6 土样试验进行拟合, 见图 4。可以看出, Burgers 模型仅拟合出 25、50 和 400 kPa 荷载下的蠕变曲线, 且相关度在 0.800 以下; Singh-Mitchell 模型可以较好地拟合出各级荷载下的蠕变, 相关度不低于 0.930, 但荷载在 400 kPa 以上时, 拟合精度明显降低, 且每级荷载下均有不同的拟合参数, 即采用该模型进行数值分析时需要录入不同应力水平下的蠕变参数(需在计算完某一级荷载下的蠕变后导出计算结果, 在下一级荷载计算时录入本级荷

载蠕变参数, 并导入上级荷载结果, 作为本级荷载的初始状态), 或采用某一级荷载的蠕变参数进行分析(蠕变结果误差较大); 本文模型可反映出各级荷载下的蠕变特性, 相关拟合度不低于 0.970, 且蠕变参数可通过土体埋深、天然孔隙比、液限孔隙比、重力密度以及荷载等指标计算得出, 采用本文模型进行数值分析时录入上述参数即可, 计算时蠕变参数与土体应力水平相对应, 计算精度可靠。

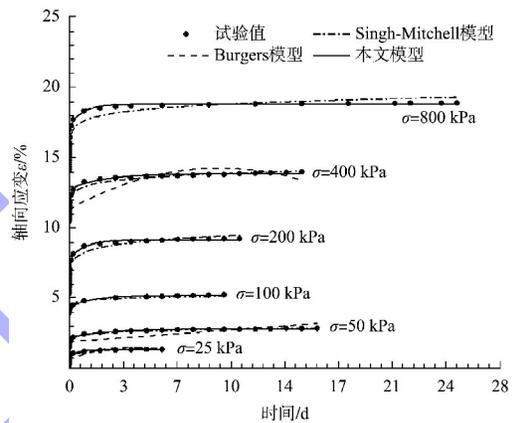


图 4 蠕变模型对比曲线

Fig. 4 Comparison curves of creep models

3 工程实例分析

3.1 模型验证

就软土的蠕变沉降计算而言, 理论上的拉普拉斯变换方法只能求解线性蠕变问题, 并且由于拉氏反演的困难, 许多大型结构在软土上的沉降是无法通过解析解求得的。因此, 需要对计算软件进行二次开发, 实现软件蠕变问题的非线性求解。

以单轴蠕变 8m 埋深土样(A_4)为例, 采用自编 UMAT 子程序有限元模拟蠕变试验过程。有限元分 3 步进行计算: 第 1 步设置初始预应力场, 并设置 Geostati 分析步, 与设置的初始应力状态相平衡; 第 2 步施加应力, 模拟一维固结蠕变试验中的瞬时加载; 第 3 步进行蠕变分析, 保持荷载大小不变, 计算其在应力不变的条件下的蠕变变形量。拟合结果见图 5, 对比结果见表 3。可以看出, 数值模拟值与试验值误差在 $\pm 5\%$ 以内, 最终

不同荷载下应变与试验值相吻合,证明子程序开发合理。

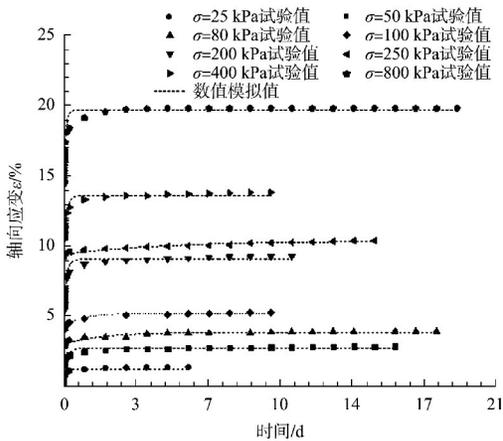


图5 模拟值与试验值对比

Fig. 5 Comparison of simulated and test values

表3 蠕变试验值与模拟值对比

Tab. 3 Comparison of creep test and simulated values

荷载/ kPa	轴向应变/%		误差/ %
	试验值	模拟值	
25	1.33	1.39	4.28
50	2.84	2.70	-4.90
80	3.88	3.83	-1.39
100	5.23	5.39	3.07
200	9.23	9.53	3.25
250	10.34	10.33	-0.08
400	13.79	14.13	2.47
800	19.80	19.65	-0.75

3.2 工程实例

某填海工程土层分为三大层:1)海相沉积的软土层,土层厚度9~14 m;2)海陆交互相沉积的黏土和粉质黏土层,呈可塑-硬塑状,厚度6~13 m。3)陆相沉积的黏土和粉质黏土层,呈硬塑状,厚度普遍大于20 m。土层由上至下的参数指标见表4。该工程于2016年6月完成块石抛填,抛填厚度20 m。

表4 土层物理参数指标

Tab. 4 Physical parameter indices of soil layers

土层	厚度/m	$\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	$w/\%$	$w_L/\%$	e	e_L
② ₁ 黏土	5	17.8	42.3	44.9	1.207	1.223
② ₂ 黏土	6	17.9	42.0	53.1	1.222	1.336
③ ₁ 黏土	16	19.5	27.4	42.6	0.793	0.996
③ ₂ 粉质黏土	21	19.8	24.4	36.2	0.701	0.878
③ ₃ 黏土	15	19.9	24.9	41.0	0.721	0.934

建立地基仿真模型,分析块石抛填结束后,历时2700 d的深厚软基的蠕变变形,见图6。可以看出,地基沉降量初期迅速增大,并在块石抛填结束后200 d沉降增加量逐渐减小。在完成块石抛填后,历经2700 d时,沉降实测值为127.16 mm,模拟值为124.48 mm,误差在5%以内,满足工程使用需求;且模拟计算沉降曲线与实测沉降曲线基本吻合,证明本文模型预测软土地基沉降是可靠的,能够为实际工程提供参考。

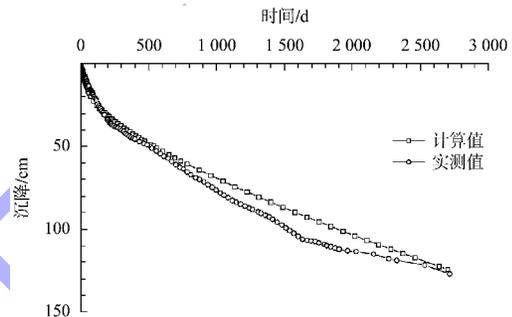


图6 软基沉降对比曲线

Fig. 6 Comparison curve of soft ground settlement

4 结论

1) 表层软土在第1级荷载作用下,试样的压缩变形最大,软土的沉积历史和沉积环境对其压缩变形有较大影响。在较低荷载水平下,软土蠕变主要呈现衰减稳定型蠕变特征;荷载水平较高时蠕变变形将会呈现等速蠕变状态,且等速蠕变变形速率以及持续时间随荷载水平的增加而增大。

2) 基于五元件广义 Kelvin 模型,本文建立综合考虑土体固结荷载、重力密度、孔隙比、液限孔隙比以及埋深等指标的蠕变模型,得到模型中5个参数的归一化经验公式。该模型与试验值拟合度较高,能够较准确地描述软土的蠕变特性。

3) 根据本文蠕变模型编写 UMAT 子程序,实现有限元仿真模拟,并通过对单轴蠕变试验模拟,验证了子程序的可靠性。通过对某填海工程地基

处理工程实例,对超厚软土地基的长期沉降进行仿真分析,相关误差在5%以内,满足工程要求,进一步验证了模型的准确性。

参考文献:

- [1] 王金龙,胡立健,陈建琦,等. 预压作用下重塑软土蠕变特性试验研究[J]. 水利水运工程学报, 2023(4): 122-129.
WANG J L, HU L J, CHEN J Q, et al. Experimental study on creep behavior of reconstituted soft clay considering preloading effect [J]. Hydro-science and engineering, 2023(4): 122-129.
- [2] 梁荣康,张庆军,张成,等. 前海软土蠕变特性试验及模型参数研究[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(S2): 133-136.
LIANG R K, ZHANG Q J, ZHANG C, et al. Creep characteristics and model parameters of Qianhai soft soil[J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2021, 43(S2): 133-136.
- [3] 邱国阳,陈智寿,谈华顺,等. 温州地区典型软土蠕变特性试验研究[J]. 公路, 2019, 64(2): 206-211.
QU G Y, CHEN Z S, TAN H S, et al. Experimental research on creep properties of typical silt in region of Wenzhou[J]. Highway, 2019, 64(2): 206-211.
- [4] 谭儒蛟,焦宇杰,徐文杰. 天津滨海软土蠕变参数及路基沉降效应分析[J]. 水文地质工程地质, 2015, 42(4): 67-73.
TAN R J, JIAO Y J, XU W J. Tests on the creep parameters of the soft soil in Tianjin coastal region and analysis on the effect of subgrade settlement deformation [J]. Hydrogeology & engineering geology, 2015, 42(4): 67-73.
- [5] 杨爱武,张兆杰,孔令伟. 不同应力状态下软黏土蠕变特性试验研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(S2): 53-60.
YANG A W, ZHANG Z J, KONG L W. Experimental study of creep property of soft clay under different stress conditions[J]. Rock and soil mechanics, 2014, 35(S2): 53-60.
- [6] 王笑,陈辉,王赵明,等. 考虑软土蠕变效应的路基沉降有限元反演分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2020, 40(3): 460-466.
WANG X, CHEN H, WANG Z M, et al. Finite element inverse analysis for soft soil subgrade settlement considering creep behavior [J]. Journal of disaster prevention and mitigation engineering, 2020, 40(3): 460-466.
- [7] 袁宇,刘润,邱长林,等. 与应力相关的软土蠕变本构模型的建立和应用[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2018, 51(7): 711-719.
YUAN Y, LIU R, QIU C L, et al. Establishment and application of creep constitutive model related to stress level of soft soil[J]. Journal of Tianjin University (science and technology), 2018, 51(7): 711-719.
- [8] 陈建永. 基于 ABAQUS 的软土蠕变模型二次开发研究[J]. 地质灾害与环境保护, 2015, 26(2): 109-112.
CHEN J Y. Abaqus-based secondary development of soft soil creep model [J]. Journal of geological hazards and environment preservation, 2015, 26(2): 109-112.
- [9] 葛栋林,史宏达. 考虑蠕变特性的斜坡堤软土地基变形数值分析[J]. 海岸工程, 2011, 30(1): 1-8.
GU D L, SHI H D. Numerical analysis on deformation in consideration of creep behavior of soft soil foundation under sloping breakwater [J]. Coastal engineering, 2011, 30(1): 1-8.
- [10] 郭培玺,虞子楠. 基于改进 Burgers 模型的海相软土剪切蠕变特性[J]. 水运工程, 2022(3): 157-162, 192.
GUO P X, YU Z N. Shear creep characteristics of marine soft soil based on improved Burgers model [J]. Port & waterway engineering, 2022(3): 157-162, 192.
- [11] 詹美礼,钱家欢,陈绪禄. 软土流变特性试验及流变模型[J]. 岩土工程学报, 1993, 15(3): 54-62.
ZHAN M L, QIAN J H, CHEN X L. Tests on rheological behavior of soft soil and rheologic model [J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 1993, 15(3): 54-62.