



某大型填海造地工程人工岛护岸结构 固结沉降及蠕变数值分析*

赵杰, 程翔, 王桂萱

(大连大学土木工程技术研究与开发中心, 辽宁大连 116622)

摘要: 为了分析填海造地工程中软基沉降的影响因素, 运用岩土工程专业有限元分析软件PLAXIS, 借鉴日本关西机场工程经验数据, 采用软土蠕变模型, 进行整个场区的固结沉降及其孔压消散数值模拟, 绘制出不同基准期沉降及孔压分布图, 对比分析不同深度地基土层孔压消散趋势, 得出相应成果。此外, 针对软土蠕变模型中的主要参数开展敏感性分析, 总结其对沉降结果的影响规律, 相应成果可为填海造地相关工程提供参考和指导。同时提出, 蠕变指标的经验取值法尚未得到广泛应用, 有待于进一步研究。

关键词: 填海造地; 软土蠕变模型; 固结沉降; 孔压; 数值分析

中图分类号: TU 433

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2013)05-0150-07

Numerical analysis of consolidation settlement and creep deformation in artificial island bank protection structure of a large-scale marine reclamation land project

ZHAO Jie, CHENG Xiang, WANG Gui-xuan

(Dalian University R&D Center of the Civil Engineering Technology, Dalian 116622, China)

Abstract: In order to analyze the factors of settlement of soft foundation in marine reclamation land project, as a professional geotechnical engineering finite element software, the PLAXIS is used in this paper, and learn from Japan's Kansai airport project experience data, soft soil creep model is used and consolidation settlement and pore pressure dissipation of the numerical analysis of the entire area is done. It also draw out the settlement and pore pressure results of different base period in figure comparative analysis, and the different depth of soil pore water pressure dissipation trends. In addition, this paper carries out the necessary sensitivity analysis and obtains the law of the main parameters in soft soil creep model on the results of settlement, and its corresponding results for marine reclamation land project to provide reference and guidance. Moreover, it is suggested that the empirical method of the creep index value has not been applied widely, further research needs to be done.

Key words: marine reclamation land; soft soil creep model; consolidation settlement; pore pressure; numerical analysis

在我国沿海地区, 分布着大量含水量较高的软弱土层, 如天津、大连、青岛等地的滨海相沉积软土。这类软土主要由细粒土组成, 其主要种类是淤泥质类土。就软土工程性质而言, 具有含水量高、强度低、渗透系数小以及明显的流变

性。其中土的流变现象是最为普遍的, 如软土路基工后沉降变形、蠕变引起的边坡失稳等都属于土的流变范畴。在填海造地工程建设中遇到的主要就是上述软土, 因此, 必须综合考虑固结和软土蠕变的长期影响。

收稿日期: 2012-10-17

***基金项目:** 辽宁省教育厅资助项目 (0102517), 大连市科学技术基金 (2010J21DW013)

作者简介: 赵杰 (1980—), 男, 博士, 研究方向为地下工程、工程抗震。

地基沉降通常包括初始沉降和工后沉降(主固结沉降和次固结沉降)。Terzaghi固结理论假定在固结过程中法向总应力不随时间变化,因此只能近似计算固结沉降,而Biot方程^[1-2]不仅可以解出初始沉降和固结沉降,同时还能求得水平位移。然而,上述两种理论均没考虑到次固结影响,与实际沉降值出入较大。事实上,对大部分软土来讲,次固结变形在总变形量中占的比重很大,这部分土体变形不可忽略。为此,学者们纷纷提出了考虑流变特性的固结理论,使得在计算沉降量时考虑到次固结这一因素。20世纪30年代,Bingham提出材料流变理论,标志着流变学科的产生;随后我国学者陈宗基将流变理论应用于固结理论,并建立了考虑流变的固结理论,在此基础上推导得出固结方程及其方程的解^[3];Folque提出了考虑流变问题非饱和土的固结模型,并得出了模型本构方程的解,基于有限元法的软基沉降问题的研究被推广开来^[4-5]。汤斌等^[6]采用自编的有限元程序进行了基于流变性质的软土地基固结分析;Mamoru Mimura等^[7]针对关西国际机场一号跑道进行了研究,对比了现场实际监测值和工后固结沉降有限元数值计算结果,二者结果基本吻合。笔者借鉴日本关西机场工程经验数据,主要采用软土蠕变模型及其平面有限元法,对某填海造地工程进行固结沉降及蠕变分析计算,并针对影响土体固结和蠕变的几个因素进行敏感性分析,得出相应成果,为沿海软土地区填海造地相关工程提供参考和指导。

1 固结基本原理

土体的超孔隙水压力逐渐消散,内部含水缓慢渗出,有效应力在一定范围内逐渐增大,这种现象称为土的固结。工程实践中,软土不仅在超孔隙水压力完全消散之前产生固结沉降,即使在固结完成(超静水压力完全消散)之后,软土仍产生一定量沉降变形。因此,完整的土体沉降应该是考虑软土蠕变与固结共同作用的结果。

PLAXIS中使用的固结基本方程^[8]是基于比奥(Biot)理论得出。渗流问题采用达西(Darcy)

定理,基于小应变理论,并且假设土体骨架弹性变形。根据太沙基(Terzaghi)原理,土体中的应力分为有效应力和孔隙压力:

$$\sigma = \sigma' + m \times (P_{\text{steady}} + P_{\text{excess}}) \quad (1)$$

式中: $\sigma = (\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{zz}, \sigma_{xy}, \sigma_{yz}, \sigma_{zx})^T$; $m = (1, 1, 1, 0, 0, 0)^T$, m 包含单位正应力分量和零剪应力分量的矢量; σ 为总应力矢量; σ' 为有效应力; P_{excess} 为超孔隙水压力。固结过程最终的稳态解表示为 P_{steady} , 在PLAXIS中 P_{steady} 定义如下:

$$P_{\text{steady}} = \sum Mweight \cdot P_{\text{input}} \quad (2)$$

式中: P_{input} 是孔隙压力,在输入程序里基于浸润线或者地下水计算得到; $Mweight$ 为土体密度的总乘子。本构方程可以写成增量的形式。 $\dot{\sigma}'$ 是有效应力增量, $\dot{\varepsilon}$ 是应变增量,本构方程为:

$$\dot{\sigma}' = \underline{M} \times \dot{\varepsilon} \quad (3)$$

$$\dot{\varepsilon} = (\dot{\varepsilon}_{xx}, \dot{\varepsilon}_{yy}, \dot{\varepsilon}_{zz}, \dot{\gamma}_{xy}, \dot{\gamma}_{yz}, \dot{\gamma}_{zx})^T \quad (4)$$

式中: $\underline{M}$ 是材料刚度矩阵。

2 软土蠕变模型(SSC)

本文数值计算主要采用软土蠕变模型(Soft-Soil-Creep Model)来模拟整个场区的地基固结沉降和次固结沉降。软土蠕变模型是由Neher&Vermeer等^[9]提出的基于标准24 h加载固结试验所得到的一维蠕变模型扩展的三维蠕变模型。其主要参数包括天然密度 ρ , 饱和密度 ρ_{sat} , 水平渗透系数 K_h , 竖向渗透系数 K_v , 粘聚力 c , 内摩擦角 φ , 剪胀角 ψ , 修正压缩指数 λ^* , 修正膨胀指数 κ^* , 修正蠕变指数 μ^* 。

Buisman最早给出恒定有效应力下的蠕变公式:

$$\varepsilon = \varepsilon_c - C_B \lg\left(\frac{t_c + t'}{t_c}\right) \quad (5)$$

随后, Butterfield提出了新的形式:

$$\varepsilon = \varepsilon_c - C1 \ln\left(\frac{\tau_c + t'}{\tau_c}\right) \quad (6)$$

式中: ε_c 为主固结完成时的总应变; t_c 为主固结完成的时间; 式(5)中的 t_c 用式(6)中的 τ_c 代替后, 可得到 $t' = t - t_c$ 为有效蠕变时间。综合学者们对于蠕变模型研究的成果, 如Jianhua Yin等^[10], 可以用以下的形式描述 ε_c :

$$\varepsilon_c = \varepsilon_c^e + \varepsilon_c^c = -A \ln\left(\frac{\sigma'}{\sigma_0'}\right) - B \ln\left(\frac{\sigma_{pc}}{\sigma_{p0}}\right) \quad (7)$$

$$\varepsilon_c = \varepsilon_c^e + \varepsilon_c^c = -A \ln\left(\frac{\sigma'}{\sigma_0'}\right) - B \ln\left(\frac{\sigma_{pc}}{\sigma_{p0}}\right) - C \ln\left(\frac{\tau_c + t'}{\tau_c}\right) \quad (8)$$

式中: σ_0' 为加载前初始有效应力; σ' 为最终荷载有效应力; σ_{p0} 和 σ_{pc} 分别为加载前预压固结应力和最终固结应力; σ_p 为预压固结压力。对时间求导, 且令

$$\frac{\tau}{\tau_c} = \left(\frac{\sigma'}{\sigma_{pc}}\right)^{\frac{B}{C}} \quad (9)$$

最后得出蠕变公式:

$$\dot{\varepsilon} = \dot{\varepsilon}^e + \dot{\varepsilon}^c = -A \frac{\dot{\sigma}'}{\sigma'} - \frac{C}{\tau} \left(\frac{\sigma'}{\sigma_p}\right)^{\frac{B}{C}} \quad (10)$$

其中:

$$A = \frac{C_r}{(1+e_0) \ln 10} \quad (11)$$

$$B = \frac{C_c C_r}{(1+e_0) \ln 10} \quad (12)$$

$$C = \frac{C_a}{(1+e_0) \ln 10} \quad (13)$$

基本刚度参数及其含义:

1) 修正压缩指数。

$$\lambda^* = \frac{C_c}{(1+e_0) \ln 10} \quad (14)$$

式中: $C_c = \frac{e_1 - e_2}{\lg p_2 - \lg p_1}$ 为压缩指数。

2) 修正膨胀指数。

$$\kappa^* = \frac{3(1-\nu_{ur})}{(1+\nu_{ur})} A = \frac{3(1-\nu_{ur})}{(1+\nu_{ur}) \ln 10} \frac{C_r}{(1+e_0)} \quad (15)$$

式中: C_r 为膨胀指数; ν_{ur} 为卸载-再加载泊松比。

3) 修正蠕变指数。

$$\mu^* = \frac{C_a}{(1+e_0) \ln 10} \quad (16)$$

式中: C_a 为蠕变指数。

3 工程实例分析

3.1 工程概况

某临港产业园填海造地工程面积约 21 km²。该工程场地形成后地顶高程为 3.1 m, 填筑矩形人工岛, 长 6 621.1 m, 宽 3 328.3 m。临港产业园人工岛护岸和陆域形成包括清淤、水上抛石、水

下爆夯、陆上推进回填等。场地地层结构由海相、海陆交互相和陆相三大沉积层组成, 覆盖层厚 50~80 m。海相沉积层包括淤泥、淤泥质粉质黏土、淤泥质土、淤泥混砂, 属于流塑-软塑状态, 局部较多粉细砂; 海陆交互相沉积层包括黏土、粉质黏土, 属于可塑-硬塑状态, 局部夹粉细砂; 陆相沉积层包括黏土、粉质黏土, 属于硬塑状态, 基岩层以强风化岩为主。本文仅以该工程护岸结构(图1)为例, 对不同位置的沉降及超孔压分布规律进行对比分析。

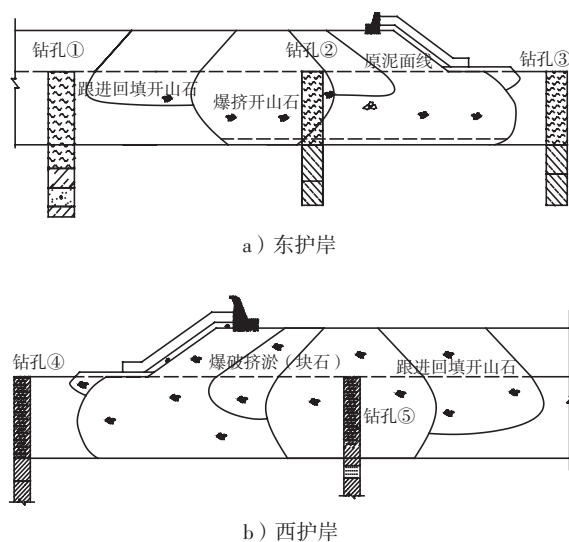
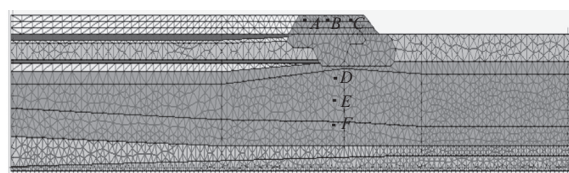


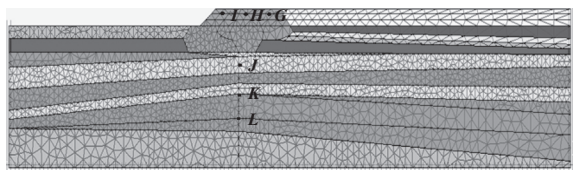
图1 典型护岸结构剖面图

3.2 计算参数及模型

计算采用岩土工程专业有限元分析软件 PLAXIS, 建立二维沉降分析模型, 采用二阶六节点三角形单元, 模型最大高度 80 m, 宽度 425 m, 其中东护岸划分成 3 280 个单元, 6 677 个节点; 西护岸划分成 3 018 个单元, 6 153 个节点, 见图 2。由于工程中土层种类繁多, 本文列出计算中用到的部分典型土体计算参数(表 1), 其中基岩层、砂层以及回填块石采用 Mohr-Coulomb 模型, 所有黏性土采用 SSC 模型。



a) 东护岸



b) 西护岸
图2 护岸有限元模型

表1 典型土层物理力学参数

土体名称	土体本构模型	饱和容重 ρ $/(t \cdot m^{-3})$	孔隙比 e	粘聚力 C / kPa	内摩擦角 $\varphi/(^{\circ})$	渗透系数 $k/(m \cdot d^{-1})$	压缩指数 λ	膨胀指数 κ	蠕变指数 μ	泊松比 ν	刚度 E/MPa
淤泥	SSC	16.6	1.64	13.1	12.40	0.000 25	0.105	0.021 0	0.004 2		
黏土	SSC	19.0	0.91	38.8	13.70	0.000 23	0.052	0.010 5	0.002 1		
粉质黏土	SSC	19.6	0.78	41.8	17.60	0.000 19	0.046	0.009 3	0.001 9		
粉细砂	M-C	19.0		0.1	27.00	2				0.35	50
块石	M-C	20.0		0.1	38.00	8				0.28	150
强风化岩	M-C	20.5		0.1	38.00	8				0.30	180

0.638 m, 东护岸区最大沉降0.586 m。东、西护岸沉降值有所不同的原因是: 护岸处下卧土层物理力学性质不同, 东护岸下卧土层为淤泥质粉质黏土薄层, 而西护岸下卧土层为厚层淤泥, 采用抛石挤淤处理后仍然存在少量淤泥, 故沉降比东护岸略大。

表2 工后不同基准期内护岸残余沉降

断面位置	不同基准期沉降/m			
	5 a	10 a	20 a	100 a
西护岸	0.183	0.295	0.389	0.638
东护岸	0.151	0.256	0.343	0.586

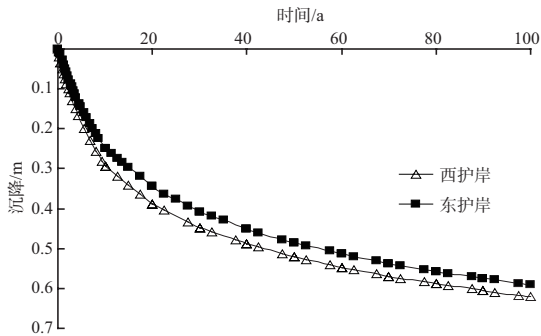


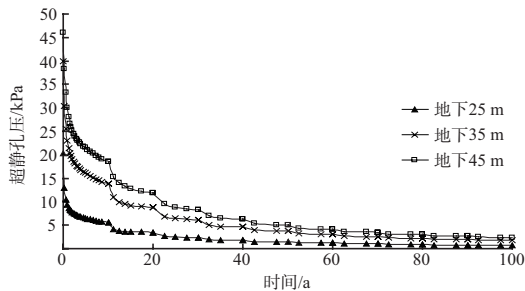
图3 工后护岸沉降趋势对比

通过25 m, 35 m和45 m不同深度处孔隙水压力消散(图4)的对比可以看出, 地基深部超静孔隙水压力消散缓慢, 场区还将缓慢下沉, 但趋势有所变缓。模型采用单向排水, 左、下、右3个边界为不排水边界。渗流路径自下而上, 渗径的长短是孔压消散快慢的主要决定性因素之一。另外

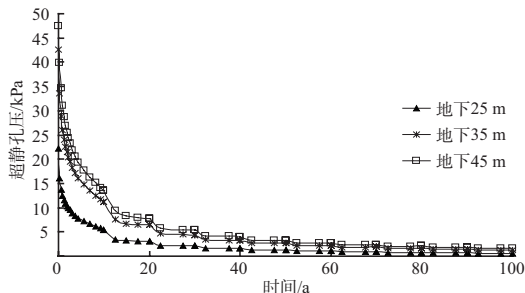
3.3 计算结果分析

以上计算分析所得结果如表2和图3所示。可以看出, 竣工后不同基准期内的残余沉降规律如下: 东、西护岸沉降量随着时间的增加逐渐增大, 渐趋平缓, 竣工100 a后西护岸区最大沉降

一个决定性因素是渗透系数(砂土渗透系数在2~7 m/d, 回填块石渗透系数为8 m/d): 临近砂土和块石的区域, 明显加速孔压消散。根据地质勘察报告, 土层渗透系数除了砂层以外均在 $10 \times 10^{-3} \sim 10 \times 10^{-4}$ m/d, 故同一深度土层消散快慢相近。此外, 个别特殊情况出现在护岸处, 由于换填区域大, 且换填的跟进开山石渗透系数远大于换填前的淤泥质土层, 有加速排水效果, 导致护岸处孔压消散比较快。



a) 东护岸



b) 西护岸

图4 超静孔隙水压力消散

由以上图表结果可以分析得出：护岸区超静孔隙水压力消散较快，竣工100 a后，浅层土中超静孔隙水压力趋于0，土体固结沉降基本结束，但深部土层还有一定量的超静孔隙水压力没有消散，未消散的超静孔隙水压力约占总超静孔隙水压力的8%左右。

目前，现有的实测数据是2011年8月19日—2012年8月5日东护岸沉降值。为对比验证数值模拟分析结果的准确性，模拟计算了东护岸填筑完毕后346 d的沉降值，由图5可以看出：实测沉降值为16.2 cm，而数值模拟结果为18.9 cm，由此可知数值模拟的结果与实际监测值相近，且偏于保守。

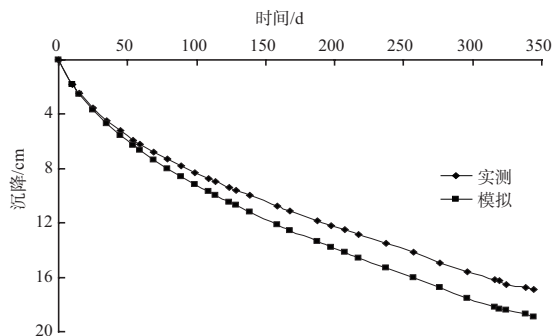


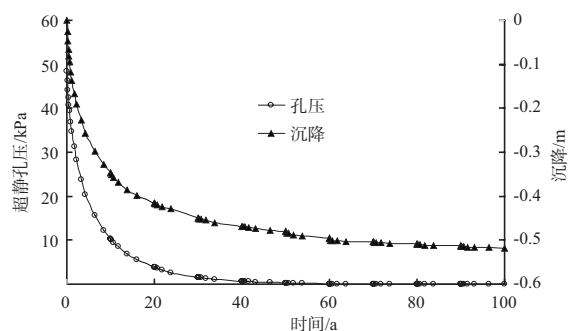
图5 东护岸工后沉降对比

4 敏感性分析

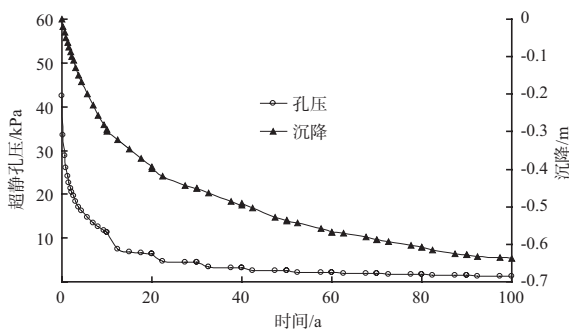
准确选定土工模型及其参数，是对岩土体力学行为进行定性和定量分析的前提。本构模型及相应参数的选取都将影响土体沉降分析的合理性。考虑到岩土体参数的离散型，笔者针对填海造地工程沉降数值分析，开展土体主要力学参数变化对沉降影响的敏感性分析。

4.1 模型选取影响

软土模型（SS模型）是一种Cam-Clay类型的模型，特别适用于接近正常固结的黏性土的主压缩，它不能用来解释流变现象（主要表现为蠕变和应力松弛），而土体都会产生一定蠕变，主压缩后就会跟随着某种程度的次压缩。软土蠕变模型（SSC模型）恰恰适用于土流变问题的求解。因此，对比SS模型和SSC模型对于沉降计算的结果，可以更直接地看出软土的蠕变特性对最终沉降的影响（图6）。



a) SS模型结果



b) SSC模型结果

图6 SS模型与SSC模型沉降曲线对比

由图6可以看出，孔压斜率趋于0时，标志主固结沉降基本结束（65 a左右），此刻起至工后百年内，基于SS模型的沉降值增幅不大，且曲线十分平缓；而基于SSC模型的沉降值，在此段时间内显著增大，并且在百年后仍有继续增大的趋势，但曲线斜率逐渐变小，沉降最终将在某一时刻趋于稳定。

由表3可以看出，基于SSC模型的计算结果中，东护岸蠕变沉降量占工后100 a沉降的16%，西护岸占15.5%，反映出当超孔隙水压力趋于0，主固结沉降基本结束后，仍发生持续蠕变变形，这与客观理论相符。而使用SS模型进行的计算表明，除去有限元计算的误差外，超孔隙水压力消散后几乎不发生蠕变变形，这与客观理论不符，从而肯定了SSC模型计算软土蠕变变形的合理性。

表3 两种模型蠕变沉降结果对比

断面位置	模型	S_1/m	S/m	S_2/m
东护岸	SSC	0.492	0.586	0.094
	SS	0.501	0.518	0.017
西护岸	SSC	0.539	0.638	0.099
	SS	0.512	0.525	0.013

注： S_1 为超孔隙水压力趋于0时的沉降量， S 为工后100 a总沉降量， S_2 为计算蠕变沉降量。

4.2 蠕变指标影响

本次二维沉降数值分析中,参考日本关西机场经验数据^[11],取蠕变指数为压缩指数的1/25,为分析蠕变指数对残余沉降的影响,开展了蠕变指标敏感性分析。图7是修正蠕变指数分别取修正压缩指数的1/20,1/25,1/30情况下西护岸不同基准期内的沉降变化。可以看出,最终的残余沉降随蠕变指数的减小而减小,并且曲线变缓。

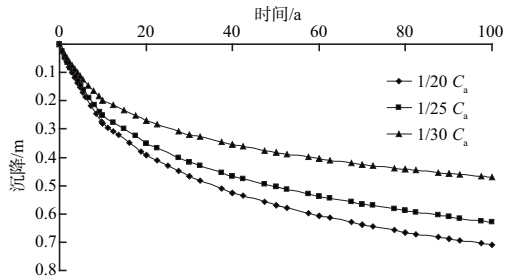


图7 修正蠕变指标变化对残余沉降的影响

4.3 超固结比影响

仅改变超固结比 OCR 值的大小,分析其对沉降趋势及最终结果的影响:将 OCR 值分别增大25%,50%,其他条件不变,得出结果见表4。可以看出: OCR 值越大,达到沉降稳定的时间越短,最终沉降量也随之变小。

表4 超固结比 OCR 对残余沉降的影响

OCR 值	位置	不同基准期沉降/m			
		5 a	10 a	20 a	100 a
原值	西护岸	0.183	0.295	0.389	0.638
	东护岸	0.151	0.256	0.343	0.586
25%	西护岸	0.135	0.224	0.313	0.583
	东护岸	0.120	0.205	0.280	0.491
50%	西护岸	0.122	0.194	0.265	0.483
	东护岸	0.106	0.172	0.231	0.389

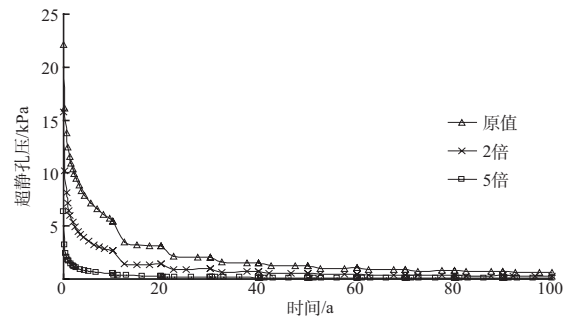
4.4 渗透系数影响

仅改变土体的渗透系数,分析其对孔压消散快慢以及最终沉降的影响。现将土体渗透系数分别扩大至原值的2倍和5倍,其他条件不变,从而得出渗透系数的影响见图8和表5。

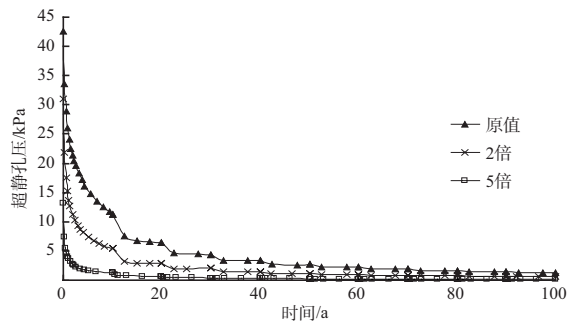
表5 渗透系数对沉降的影响

渗透系数取值	位置	不同基准期沉降/m			
		5 a	10 a	20 a	50 a
1倍	西护岸	0.183	0.295	0.389	0.514
2倍	西护岸	0.209	0.325	0.436	0.519
5倍	西护岸	0.296	0.412	0.501	0.522

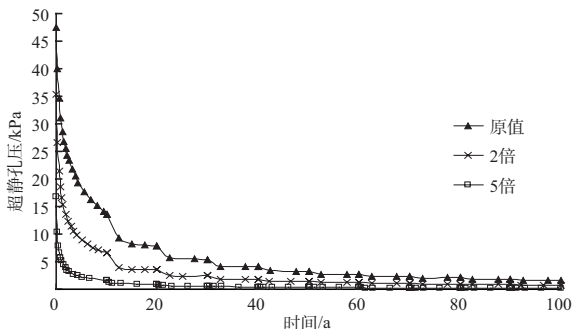
注:渗透系数取值分别取原值的1倍、2倍和3倍。



a) 地下25 m



b) 地下35 m



c) 地下45 m

图8 渗透系数扩大2倍、5倍孔压消散情况对比

由图8和表5可以看出,渗透系数越大,孔压消散越快,达到沉降稳定的时间就越短,最终沉降值虽略有增加,但相差不大。

5 结论

1) 填海造地工程竣工100 a后,护岸区最大沉降约0.6~0.7 m,从固结度分布图和超静孔隙水压力消散图分析,场区竣工100 a后深部土体内部仍有少量超静孔隙水压力没有消散,场区还将缓慢下沉,但趋势将逐渐变缓。

2) 基于PLAXIS的软土蠕变模型及其有限元计算方案能够较确切地描绘软土地基沉降趋势,并能够对蠕变情况进行较为准确的预测,为预留

沉降量提供依据, 保证填海造地工后的高程满足设计要求。

3) 计算参数的敏感性分析结果表明: OCR 值越大, 达到沉降稳定的时间越短, 最终沉降量也随之变小; 渗透系数越大, 孔压消散越快, 达到沉降稳定的时间就越短, 最终沉降值略有增加, 但相差不大。

4) 本次沉降数值分析中, 参考日本关西机场工程经验取值 ($C_d/C_c=0.04 \pm 0.01$), 取修正蠕变指标为修正压缩指标的 $1/25$, 为了将蠕变相关参数的经验取值方法推广应用, 还需要在相关领域开展更广泛的研究。

参考文献:

- [1] Biot M A. General solutions of the equations of elasticity and consolidation for a porous material[J]. Journal of Applied Mechanics, 1956, 23:91-96.
- [2] Biot M A. General theory of three-dimensional consolidation[J]. Journal of Applied Physics, 1941, 12: 155-164.
- [3] 陈宗基. 固结及次时间效应的单向问题[J]. 土木工程学报, 1958(1): 1-10.
- [4] 陈文苏. 软土蠕变沉降的数值模拟[D]. 天津: 天津大学, 2004.
- [5] 孙钧. 岩土材料流变及其工程运用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999.
- [6] 汤斌, 陈晓平, 张伟. 考虑流变性状的软土地基固结有限元分析[J]. 岩土力学, 2004, 25(4): 583-586.
- [7] Mimura M, Jeon B G. Numerical assessment for the behavior of the pleistocene marine foundations due to construction of the 1st phase island of Kansai international airport[J]. Soils and Foundations, 2011, 51(6): 115-118.
- [8] Brinkgreve R B J. Plaxis version 8 scientific manual [M]. Netherlands: A A Balkema Publishers, 2002.
- [9] Vermeer P A, Neher H P. A soft soil model that accounts for creep[G]//Beyond 2000 in Computational Geotechnics-10 Years of PLAXIS International. Netherlands: A A Balkema Publishers, 1999.
- [10] Yin J H, Graham J. Viscous-elastic-plastic modeling of one-dimensional time-dependent behavior of clays[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1989, 29: 199-209.
- [11] Mimura M, Jeon B G. Interactive behavior of the pleistocene reclaimed foundations due to the construction of the adjacent reclamation[J]. Annuals of Disas Prev Res Inst: Kyoto Univ, 2011, 54B: 1-16.

(本文编辑 武亚庆)

· 消 息 ·

四航局成功研制国内首台海洋环境与动荷载耦合试验设备

4月15日, 四航局成功研制国内首台海洋环境与动荷载耦合试验设备, 并拥有了该产品的自主知识产权。

该设备包括动载加载装置与海洋环境试验箱两部分。其中, 动载加载装置为50 t 疲劳试验机, 可提供多种频率与加载方式的动荷载; 海洋环境试验箱可提供盐水浸泡、盐水涨落及盐雾喷洒环境, 模拟海洋水下区、水位变动区及浪溅区等海洋环境特点。整个设备真实模拟了海工建筑物在荷载与环境耦合作用下的工作环境, 首次实现了动载与海洋环境耦合加载, 填补了工程实际中环境与荷载耦合作用下混凝土耐久性研究领域的技术空白。

该设备同时也为四航局参与的交通运输部“十一五”重大专项课题“环境与荷载耦合作用下海工混凝土结构耐久性及其可靠度设计方法研究”的顺利开展提供了技术保障。

摘编自《中国交通建设网》