

引用本文:刘忠玉,范智钺,朱新牧,等.施工荷载下理想砂井地基弹黏塑性固结分析[J].建筑科学与工程学报,2020,37(3):118-126.
LIU Zhong-yu, FAN Zhi-cheng, ZHU Xin-mu, et al. Elastic Visco-plastic Consolidation Analysis of Foundation with Ideal Sand Drains Under Construction Load[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2020, 37(3): 118-126.

DOI:10.19815/j.jace.2019.03043

施工荷载下理想砂井地基弹黏塑性固结分析

刘忠玉, 范智钺, 朱新牧, 崔鹏陆

(郑州大学 土木工程学院, 河南 郑州 450001)

摘要:为深入研究饱和黏土流变特性及施工荷载对理想砂井地基固结性状的影响,在 Barron 理想砂井固结理论基本假定的基础上,引入考虑时间效应的统一硬化(UH)本构模型描述饱和黏土的弹黏塑性变形,同时将施工荷载简化为线性加载,重新推导了理想砂井固结方程,并给出了固结方程的隐式差分格式。通过与文献中变荷载下砂井地基非线性固结方程解析解的对比,验证了研究方法的有效性。探讨了施工荷载和 UH 模型参数等对砂井地基固结进程的影响。结果表明:施工阶段砂井地基内出现的孔压升高现象不仅是施工荷载随时间增加造成的,黏土的黏滞性也是原因之一;延长工期和增大 UH 模型参数均会使砂井地基孔隙水压力的整体消散时间延长,从而减小其固结速率;当工期较长时,按瞬时加载情况计算砂井地基的固结进程将会产生较大误差,而忽略土体的黏滞性将会高估砂井地基的固结速率。

关键词:土力学;饱和黏土;理想砂井;流变固结;施工荷载;弹黏塑性;孔隙水压力

中图分类号: TU431

文献标志码: A

文章编号: 1673-2049(2020)03-0118-09

Elastic Visco-plastic Consolidation Analysis of Foundation with Ideal Sand Drains Under Construction Load

LIU Zhong-yu, FAN Zhi-cheng, ZHU Xin-mu, CUI Peng-lu

(School of Civil Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, Henan, China)

Abstract: In order to further study the rheological properties of saturated clay and the influence of construction load on the consolidation properties of ideal sand drain foundation, based on the basic assumption of Barron's ideal sand drain consolidation theory, a unified hardening (UH) constitutive model considering time effect was introduced to describe the elastic visco-plastic deformation of saturated clay. At the same time, the construction load was simplified as linear load, the consolidation equation of ideal sand drain was derived again, and the implicit difference scheme of the consolidation equation was given. Compared with the analytical solution of the nonlinear consolidation equation of sand drain foundation under variable load in the literature, the validity of the research method was verified. The influence of construction load and UH model parameters on consolidation process of sand drain foundation was discussed. The results show that the increase of pore pressure in sand drain foundation during construction is not only caused by the increase of construction load with time, but also by the viscosity of clay. Prolonging the

收稿日期:2019-06-13

基金项目:国家自然科学基金项目(51578511)

作者简介:刘忠玉(1968-),男,河南延津人,教授,博士研究生导师,理学博士,E-mail: zhyliu@zzu.edu.cn。

construction period and increasing the parameters of UH model will prolong the dissipation time of pore water pressure and reduce the consolidation rate. When the construction period is long, the calculation of the consolidation process of the sand drain foundation under the condition of instantaneous loading will produce large errors, and neglecting the viscosity of soil will overestimate the consolidation rate of sand drain foundation.

Key words: soil mechanics; saturated clay; ideal sand drain; rheological consolidation; construction load; elastic visco-plasticity; pore water pressure

0 引言

砂井排水固结法被广泛应用于处理软土地基的固结问题。1948年, Barron^[1]研究了在自由应变和等应变情况下砂井地基的固结问题, 发现2种假定下的固结度相差不大。因此, 一些学者^[2-4]基于等应变假定, 给出了砂井地基固结理论的解答, 但大都认为上部荷载是瞬时施加的, 并没有考虑加载过程对地基固结的影响。在实际工程中, 绝对瞬时加载的情况是不存在的, 而都以变荷载的形式出现。研究变荷载下砂井地基的固结问题既有理论价值, 也有现实意义。Basak等^[5]较早考虑变荷载作用下砂井地基固结问题。随后, Lekha等^[6]考虑地基变形的非线性, 研究了变荷载对砂井地基固结的影响。刘加才等^[7]改进了渗透面上连续条件, 讨论了变荷载作用下未打穿砂井的固结问题。影响砂井地基固结的越来越多因素被学者们^[8-13]考虑, 如变形非线性、变渗透系数、井阻与涂抹效应、自重应力和应力历史等因素, 使砂井固结理论越来越完善。在实际工程中发现, 由上述理论计算得到的固结度预测值与实测值之间往往存在较大差别, 究其原因应该是对土的变形特性考虑不足导致的。因为室内试验和现场观测都发现^[14], 软黏土存在较明显的流变特性, 但以上理论没有考虑流变特性的影响。

在对土体进行变形分析时, 为了考虑饱和黏土流变的影响, 先后有学者提出了元件模型^[15-16]、经验模型^[17]、黏弹塑性模型^[18]和弹黏塑性模型^[19-23]。元件模型虽然理论意义明确, 但为了获得较高的精度, 往往需要将弹簧、黏壶等基本元件多次组合, 这样就导致微分型本构方程的阶数较高, 且参数较多, 计算繁琐, 因而在应用上受到一定的限制。经验模型主要是通过对试验结果拟合得到的, 也有较多的局限性。黏弹塑性和弹黏塑性模型都是在先进弹塑性理论上建立起来的。黏弹塑性模型将软土变形分为黏弹性变形和黏塑性变形两部分。弹黏塑性模型认为, 土的弹性变形与时间无关, 只有黏塑性变形与

时间相关。相对而言, 弹黏塑性模型应用更广泛。殷建华等^[19-20]引入等效时间概念, 建立了一个新的弹黏塑性(EVP)本构模型。姚仰平等^[21-23]基于修正剑桥模型提出了考虑时间效应的统一硬化(UH)本构模型, 该模型有明确的物理意义, 参数较少, 且模型参数可通过常规土工试验方便确定, 已逐渐应用于一维固结分析。

为了更深入研究流变特性对砂井固结进程的影响, 本文在 Barron 理想砂井的基础上, 引入考虑时间效应的 UH 本构模型, 拟重新推导施工荷载下理想砂井固结方程, 并初步探讨相关参数对砂井地基固结性状的影响。

1 分析模型

某饱和软黏土地基厚度为 H , 在自重作用下固结已经完成, 设初始有效应力为 σ'_0 , 初始孔隙比为 e_0 , 顶面透水, 底面不透水。现设置打穿地基的砂井(图1), 其半径为 r_w , 影响区半径为 r_c , 井径比为 n , 且不考虑井阻和涂抹效应。然后于地基表面堆载, 并将施工荷载 p 简化为线性荷载, 即

$$p(t) = \begin{cases} p_0 t / t_c & 0 \leq t \leq t_c \\ p_0 & t > t_c \end{cases} \quad (1)$$

式中: p_0 为所施加荷载的最大值; t_c 为工期; t 为时间。

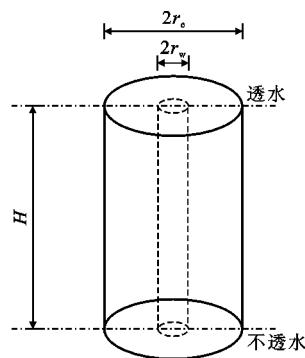


图1 分析模型

Fig. 1 Analysis Model

设在时刻 t , 半径为 r , 深度 z 处的有效应力和

超孔压分别为 $\sigma'(r, z, t)$ 和 $u(r, z, t)$, 并引入 Bar-ron^[1] 的自由应变假定, 即固结过程中, 竖向应变可以自由发展。由于砂井地基径向变形较小, 一般可忽略不计, 因此土体变形主要是竖向的^[1-13]。引入考虑时间效应的 UH 模型^[21-23] 描述土体的竖向变形, 即

$$d\epsilon_v = \begin{cases} d\epsilon_v^e + d\epsilon_v^p + d\epsilon_v^t & d\sigma' \geq 0 \\ d\epsilon_v^e + d\epsilon_v^t & d\sigma' < 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中: $d\epsilon_v$ 为竖向应变增量; $d\epsilon_v^e, d\epsilon_v^p$ 分别为由有效应力作用产生的弹性应变增量和塑性应变增量; $d\epsilon_v^t$ 为时间作用产生的黏性应变增量。

$$d\epsilon_v^e, d\epsilon_v^p, d\epsilon_v^t \text{ 可表示为} \quad (3)$$

$$d\epsilon_v^e = C_s d\sigma' / [(1+e_0)\sigma' \ln(10)] \quad (3)$$

$$d\epsilon_v^p = \frac{C_c - C_s}{(1+e_0)\ln(10)} \frac{M^4 d\sigma'}{M_t^4 \sigma'} \quad (4)$$

$$d\epsilon_v^t = C_a dt / [(1+e_0)(t_a + t_0)\ln(10)] \quad (5)$$

式中: C_s 为回弹指数; C_c 为压缩指数; C_a 为次固结系数; t_a 为老化时间; t_0 为单位时间; M_t 为潜在破坏应力比; M 为临界状态应力比。

M, M_t 表达式如下

$$M = 6\sin(\varphi) / [3 - \sin(\varphi)] \quad (6)$$

$$M_t = 6[\sqrt{\chi/R(1+\chi/R)} - \chi/R] \quad (7)$$

$$R^{-a} = (t_a + t_0) / t_0 \quad (8)$$

式中: φ 为土的内摩擦角; $\chi = M^2 / [12(3-M)]$; $\alpha = (C_c - C_s) / C_a$; R 为表示超固结程度的参数。

R 可表示为

$$R = \sigma' / \sigma'_{e0} \exp\{-[(1+e_0)\epsilon_v^p \ln(10) / (C_c - C_s)]\} \quad (9)$$

式中: σ'_{e0} 类似于先期固结压力, 为回弹线与瞬时压缩线交点的竖向应力; ϵ_v^p 为塑性应变, $\epsilon_v^p = \epsilon_v^p + \epsilon_v^t$; 不考虑时间效应时, R 的初始值 R_0 为超固结比的倒数。

假定固结过程中的渗流符合 Darcy 定律, 且孔隙比 e 和渗透系数 k 满足 Taylor^[24] 经验公式, 即

$$e = e_0 - C_k \lg(k_0 / k) \quad (10)$$

式中: k_0 为孔隙比 e_0 对应的渗透系数; C_k 为渗透指数。

根据渗流连续条件, 可得

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (\Psi r \frac{\partial \sigma'}{\partial r}) + \frac{\partial}{\partial z} (\Psi \frac{\partial \sigma'}{\partial z}) = \lambda \frac{\partial \sigma'}{\partial t} + \beta \quad (11)$$

$$\Psi = k_0 \exp[-(1+e_0)\epsilon_v \ln(10) / C_k] / \gamma_w$$

$$\beta = C_a / [(1+e_0)(t_a + t_0)\ln(10)]$$

$$\lambda = \begin{cases} \frac{C_s + (C_c - C_s)M^4 / M_t^4}{(1+e_0)\sigma' \ln(10)} & d\sigma' \geq 0 \\ \frac{C_s}{(1+e_0)\sigma' \ln(10)} & d\sigma' < 0 \end{cases}$$

式中: ϵ_v 为土体竖向应变。

初始和边界条件为

$$\sigma'(r, z, 0) = \sigma'_0 \quad r_w \leq r \leq r_e, 0 \leq z \leq H \quad (12)$$

$$\left. \begin{aligned} \sigma'(r_w, z, t) &= \sigma'_0 + p(t) \quad 0 \leq z \leq H, t > 0 \\ \sigma'(r, 0, t) &= \sigma'_0 + p(t) \quad r_w \leq r \leq r_e, t > 0 \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \sigma'(r, z, t)}{\partial r} \Big|_{r=r_e} &= 0 \quad 0 \leq z \leq H, t > 0 \\ \frac{\partial \sigma'(r, z, t)}{\partial r} \Big|_{z=H} &= 0 \quad r_w \leq r \leq r_e, t > 0 \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

2 流变固结方程求解

对于式(11)所示的变系数偏微分方程, 解析解很难求出。因此, 本文引入隐式差分法求其数值解。时间步长取为 Δt , 并沿半径方向以 Δr 为空间步长将砂井影响区等分为 N 层, 沿竖向以 Δz 为空间步长将砂井竖向等分为 Z 层, 则式(11)可以离散为

$$\begin{aligned} \sigma'_{i',j}^{k'+1} &= \sigma'_{i',j}^{k'} + \phi_{i',j}^{k'+1} (\Psi_{i'+1/2,j}^{k'+1} r_{i'+1/2} A_{i',j}^{k'+1} - \\ &\Psi_{i'-1/2,j}^{k'+1} r_{i'-1/2} B_{i',j}^{k'+1}) + \varphi_{i',j}^{k'+1} (\Psi_{i',j+1/2}^{k'+1} \cdot \\ &C_{i',j}^{k'+1} - \Psi_{i',j-1/2}^{k'+1} D_{i',j}^{k'+1}) + E_{i',j}^{k'+1} \end{aligned} \quad (15)$$

式中: 上标 k' 为时间节点, $k' = 0, 1, 2, \dots$; 下标 i', j 为空间节点, $i' = 1, 2, \dots, N-1, j = 1, 2, \dots, Z-1$; $\phi_{i',j}^{k'+1} = a_1 / (\lambda_{i',j}^{k'+1} r_{i'})$; $\varphi_{i',j}^{k'+1} = a_2 / \lambda_{i',j}^{k'+1}$; $a_1 = \Delta t / \Delta r^2$; $a_2 = \Delta t / \Delta z^2$; $r_{i'} = r_w + i' \Delta r$; $r_{i'+1/2} = r_w + (i' + 1/2) \Delta r$; $r_{i'-1/2} = r_w + (i' - 1/2) \Delta r$; $A_{i',j}^{k'+1} = \sigma'_{i'+1,j}^{k'+1} - \sigma'_{i',j}^{k'+1}$; $B_{i',j}^{k'+1} = \sigma'_{i',j}^{k'+1} - \sigma'_{i'-1,j}^{k'+1}$; $C_{i',j}^{k'+1} = \sigma'_{i',j+1}^{k'+1} - \sigma'_{i',j}^{k'+1}$; $D_{i',j}^{k'+1} = \sigma'_{i',j}^{k'+1} - \sigma'_{i',j-1}^{k'+1}$; $E_{i',j}^{k'+1} = -\beta_{i',j}^{k'+1} \Delta t / \lambda_{i',j}^{k'+1}$ 。

对初始条件式(12)离散化可得

$$\sigma'_{i',j}^0 = \sigma'_0 \quad (16)$$

对透水边界式(13)离散化可得

$$\begin{aligned} \sigma'_{0,j}^{k'} &= \sigma'_0 + p(t) \\ \sigma'_{i',0}^{k'} &= \sigma'_0 + p(t) \end{aligned} \quad (17)$$

引入虚节点 $(N+1, j)$, 并令 $\sigma'_{N-1,j}^{k'+1} = \sigma'_{N+1,j}^{k'+1}$, 即可满足砂井影响区边缘不透水边界条件, 则

$$\begin{aligned} \sigma'_{N,j}^{k'+1} &= \sigma'_{N,j}^{k'} - \phi_{N,j}^{k'+1} \Psi_{N-1/2,j}^{k'+1} (r_{N+1/2} + r_{N-1/2}) B_{N,j}^{k'+1} + \\ &\varphi_{N,j}^{k'+1} (\Psi_{N,j+1/2}^{k'+1} C_{N,j}^{k'+1} - \Psi_{N,j-1/2}^{k'+1} D_{N,j}^{k'+1}) + E_{N,j}^{k'+1} \end{aligned} \quad (18)$$

同理, 由砂井底部不透水边界条件可得

$$\begin{aligned} \sigma'_{i',Z}^{k'+1} &= \sigma'_{i',Z}^{k'} + \phi_{i',Z}^{k'+1} (\Psi_{i'+1/2,Z}^{k'+1} r_{i'+1/2} A_{i',Z}^{k'+1} - \\ &\Psi_{i'-1/2,Z}^{k'+1} r_{i'-1/2} B_{i',Z}^{k'+1}) - \varphi_{i',Z}^{k'+1} (\Psi_{i',Z+1/2}^{k'+1} + \\ &\Psi_{i',Z-1/2}^{k'+1}) D_{i',Z}^{k'+1} + E_{i',Z}^{k'+1} \end{aligned} \quad (19)$$

对节点 (N, Z) , 令 $\sigma'_{N-1,Z}^{k'+1} = \sigma'_{N+1,Z}^{k'+1}$, $\sigma'_{N,Z-1}^{k'+1} = \sigma'_{N,Z+1}^{k'+1}$, 可得

$$\sigma'_{N,Z}^{k'+1} = \sigma'_{N,Z}^{k'} - \phi_{N,Z}^{k'+1} \Psi_{N-1/2,Z}^{k'+1} (r_{N+1/2} + r_{N-1/2}) \cdot$$

$$B_{N,Z}^{k'+1}-\varphi_{N,Z}^{k'+1}(\Psi_{N,Z+1/2}^{k'+1}+\Psi_{N,Z-1/2}^{k'+1})D_{N,Z}^{k'+1}+E_{N,Z}^{k'+1}$$

(20)

这样式(15)~(20)组成封闭方程组,可用迭代法求其有效应力。为研究砂井地基整体孔压 u 消散情况,引入按孔压定义的平均固结度 U_p ,即

$$U_p=\frac{\int_0^Hdz\int_{r_w}^{r_e}2\pi r\sigma'dr}{\int_0^Hdz\int_{r_w}^{r_e}2\pi rp_0dr}=\frac{p(t)/p_0-2\int_0^Hdz\int_{r_w}^{r_e}rudr/[p_0H(r_e^2-r_w^2)]}{1}$$

(21)

假设孔压 u 在区间段径向、竖向是线性的,则任意 t 时刻孔压 u^t 可表示为

$$u^t=(u'_{i+1,j}-u'_{i,j})(r-r_i)/\Delta r+(u'_{i,j+1}-u'_{i,j})\cdot(z-z_j)/\Delta z+u'_{i,j}$$

(22)

将式(22)代入式(21)可得

$$U_p=p(t)/p_0-2\Delta z\sum_{j=0}^{Z-1}\sum_{i=0}^{N-1}S'_{i,j}/[p_0H(r_e^2-r_w^2)]$$

(23)

式中: $S'_{i,j}=\frac{I'_{R',j}}{3\Delta r}(r_{i+1}^3-r_i^3)+[\frac{1}{2}(u'_{i,j}-I'_{R',j}r_i'/\Delta r)+\frac{1}{4}I'_{Z',j}](r_{i+1}^2-r_i^2)$, $I'_{R',j}=u'_{i+1,j}-u'_{i,j}$, $I'_{Z',j}=u'_{i,j+1}-u'_{i,j}$ 。

3 算法验证

耿雪玉^[25]引入 $e\text{-lg}(\sigma')$ 和 $e\text{-lg}(k)$ 的线性关系,同时令渗透系数和压缩系数同步变化,并采用分离变量法给出了变荷载下竖井地基非线性固结方程的解析解。为验证本文算法的正确性,不考虑土体的流变特性,再令临界状态应力比等于潜在破坏应力比,即 $M=M_t$,则本文 UH 模型退化成耿雪玉^[25]采用的本构关系。采用隐式差分法计算相应方程的数值解,为便于对比,引入量纲一的参数: $T_v=[(\mu_1^2+\lambda_1^2L)C_{h0}t]/\gamma_w^2$, $L=C_{v0}r_w^2/(C_{h0}H^2)$, $C_{h0}=C_{v0}=k/(\gamma_w m_{v0})$, $R=r/r_w$, $U=u/p_0$ 。计算时,相关参数为: $\lambda_1=\pi/2$, $\mu_1=0.282$, $C_c=C_k=0.6$, $\sigma'_0=50\text{ kPa}$, $p_0=250\text{ kPa}$, $k=6.0\times10^{-7}\text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$, $e_0=1.5$, $r_w=0.2\text{ m}$, $r_e=1.0\text{ m}$, $H=2\text{ m}$, $N=80$, $Z=20$,时间步长 $\Delta t=0.1\text{ min}$,迭代精度为 1×10^{-7} ,结果如图 2 所示。很显然,本文数值与耿雪玉^[25]的解析解基本一致,这说明本文算法是有效的。

4 参数分析

为便于下文探讨相关参数对砂井地基固结性状

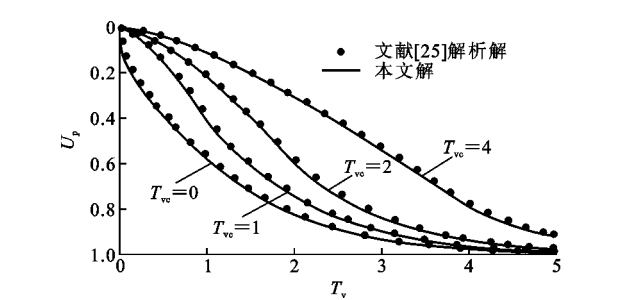


图 2 本文解与文献[25]解的对比

Fig. 2 Comparison Between Solutions of This Paper and That of Literature [25]

的影响,这里取 $H=10.0\text{ m}$, $N=50$, $Z=30$, $\sigma'=50\text{ kPa}$, $k=6.0\times10^{-7}\text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$, $e_0=1.50$, $r_w=0.05\text{ m}$, $r_e=1.0\text{ m}$, $C_c=0.5$, $C_k=0.8$, $M=0.567$, $\Delta t=0.1\text{ min}$,水的重度 $\gamma_w=10\text{ kN}\cdot\text{m}^{-3}$,迭代精度为 1×10^{-7} 。另外,主要探讨的参数取值见表 1,当讨论某一参数时,其他参数保持表 1 取值不变。

表 1 计算参数

Tab. 1 Calculation Parameters

参数	t/min	p_0/kPa	C_a	R_0	C_s
计算取值	10 000	100	0.04	0.75	0.12

4.1 工期 t_c 对固结性状的影响

为探究工期对砂井地基固结性状的影响,图 3 给出了不同工期对应的砂井影响区外边界 $z=5\text{ m}$ 处,孔压和砂井影响区范围内固结度随时间变化的曲线。从图 3(a)可以看出,在施工初期均出现了孔压升高甚至超过上覆荷载值的现象。这种现象不是单纯由于荷载不断增加引起的,因为瞬时荷载作用时这种现象最为明显。同时也不能归因于曼德尔效应,因为本文的固结方程还属于太沙基固结理论范畴。这种现象在一维弹黏塑性固结分析中也会出现^[20,26],将其归结于土体黏滞性或主次耦合机制,并认为这是由于远离排水面的土体因排水不畅而产生应力松弛导致的,该解释也同样适用于本文的砂井固结分析。把这种现象称之为“类曼德尔效应”。

另外,工期对孔压达到峰值的时间也有影响。本文算例中,瞬时加载($t_c=0\text{ min}$)时,考察点(1.0 m, 5.0 m)处孔压达到峰值的时间为 3 400 min,随着 t_c 的延长,孔压达到峰值的时间分别为 5 000, 10 000, 50 000, 100 000 min。与瞬时加载相比,随着工期的延长,孔压达到峰值的时间延后,但均是在工期结束时孔压就达到最大值。也就是说,当 t_c 大于 5 000 min 时,在加载过程中,土体黏滞性引起的孔压升高已完成,因此在施工结束的瞬间孔压也到达峰值。可以预测,当 t_c 较小时,孔压峰值应该也

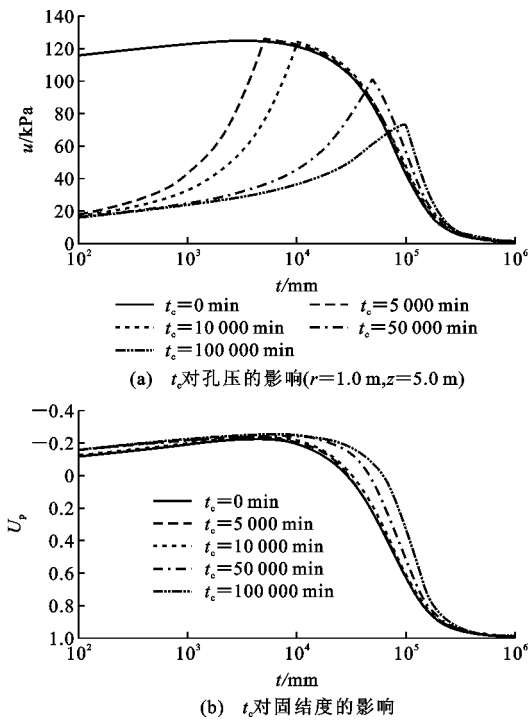


图 3 t_c 对固结性状的影响

Fig. 3 Effect of t_c on Consolidation Behavior

会出现在施工结束后一定时间。由图 3(a)可以看出,当 $t_c=0,5\,000,10\,000,50\,000,100\,000$ min 时,考察点处孔压峰值分别为 124.96,125.60,124.06,101.87,73.36 kPa。由此可知,当 t_c 小于 10 000 min 时,随着 t_c 的增大,孔压峰值逐渐增大。当 t_c 大于 10 000 min 时,随着 t_c 的增大,孔压峰值逐渐减小。

图 3(b)给出了工期对砂井地基固结度的影响曲线。可以看出,在施工初期,固结度为负值,这说明地基中较大范围内都出现了孔压升高现象。由图 3(b)可以看出,固结度最小值随着工期的延长而减小。在施工阶段及工后一定时期内,工期 t_c 越大,固结度就越小,即 t_c 的延长会延缓砂井地基的固结速率。因此,当工期较长时,不能将其等效为瞬时加载(恒载)的情况,否则会产生较大误差,这与文献[25]的结论相似。在施工完成很长时间后,固结度曲线基本重合,即工期的长短对固结后期的固结速率影响较小。文献[27],[28]均讨论了变荷载对一维流变固结的影响,发现 t_c 的增大会减缓土层的固结速率。然而在固结的后期, t_c 的影响很小,这与本文的结论相似。

4.2 最大荷载 p_0 对固结性状的影响

图 4(a)给出了 p_0 对考察点(1.0 m,5.0 m)处孔压的影响曲线。与图 3(a)相似,在加载初期,孔

压持续上升,在某时刻达到峰值后再开始下降而逐步消散。例如, $t=1\times 10^5$ min 时, $p_0=50,100,200,500$ kPa 对应考察点处的孔压与 p_0 的比值(归一化孔压)分别为 0.652 1,0.462 8,0.314 2,0.149 6。与 $p_0=50$ kPa 的归一化孔压相比,其他归一化孔压分别为 $0.710p_0,0.482p_0,0.229p_0$ 。也就是说, p_0 的增大能加快砂井地基的孔压消散速率。

按照传统线弹性地基的砂井固结理论,地基固结速率与上部荷载的大小没有关系。从图 4(b)可以看出,本文基于弹黏塑性本构关系算得的固结速率则与上部荷载的大小密切相关。随着上部荷载的增大,在相同时刻,土体的平均固结度越大,即固结越快。这与李传勋等^[28]讨论的荷载大小对固结性状的影响规律结论一致。

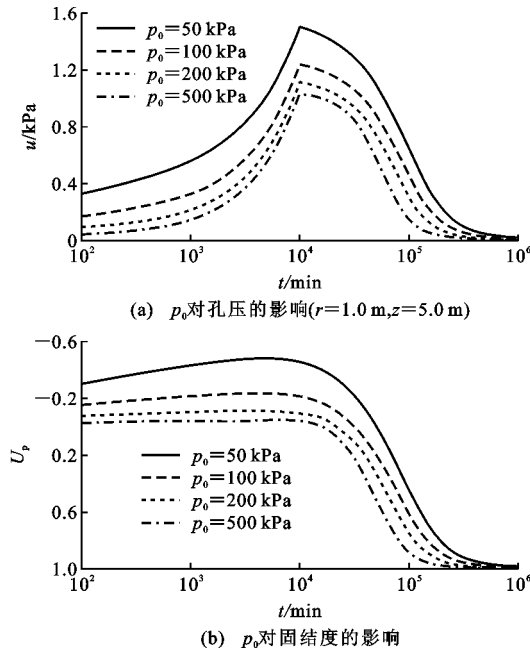


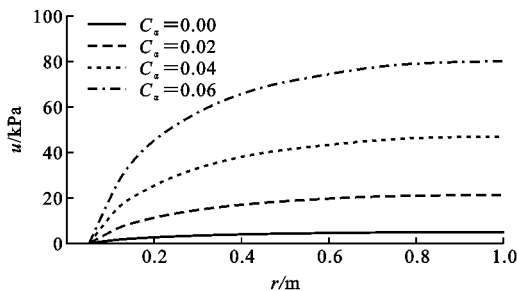
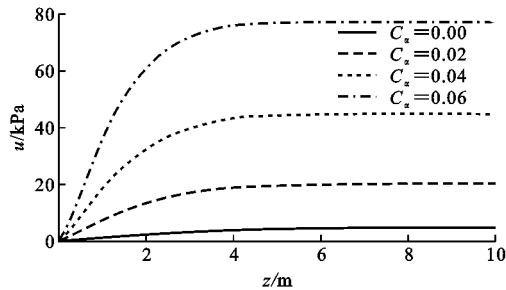
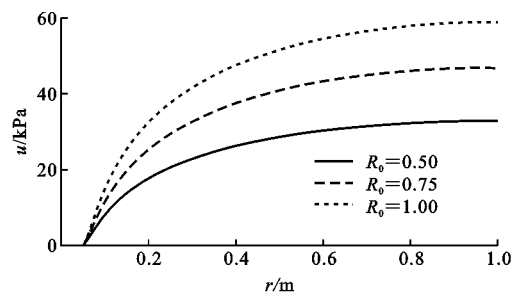
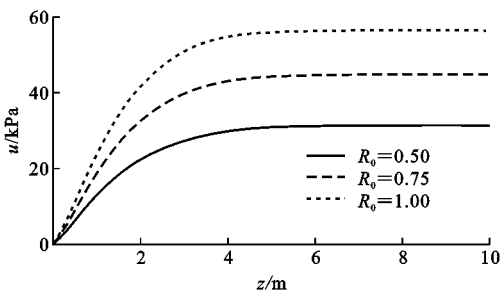
图 4 p_0 对固结性状的影响

Fig. 4 Effect of p_0 on Consolidation Behavior

4.3 UH 模型参数对孔压分布的影响

UH 模型参数 C_a, R_0 和 C_s 分别反映了土体的黏滞特性、地基的超固结程度、地基的回弹特性。为探讨 UH 模型参数对孔压的影响,本文主要研究了 $t_c=10\,000$ min 时次固结系数 C_a 、超固结参数 R_0 和回弹指数 C_s 对孔压径向、竖向分布的影响。

图 5~7 分别给出了 C_a, R_0 和 C_s 对孔压径向、竖向分布的影响曲线。可以看出,无论径向还是竖向,相同时刻几乎所有点对应的孔压值都是随着这些参数值的增大而增大,即增大 UH 模型参数会延缓孔压的消散。由图 5(a),6(a),7(a)可以看出, r 值增大即距离砂井越远,曲线之间的距离逐渐增大,

(a) 孔压径向分布($z=8\text{ m}$)(b) 孔压竖向分布($r=0.7\text{ m}$)图5 C_α 对孔压的影响 ($t=1\times 10^5\text{ min}$)Fig. 5 Effect of C_α on Pore Pressure ($t=1\times 10^5\text{ min}$)(a) 孔压径向分布($z=8\text{ m}$)(b) 孔压竖向分布($r=0.7\text{ m}$)图6 R_0 对孔压的影响 ($t=1\times 10^5\text{ min}$)Fig. 6 Effect of R_0 on Pore Pressure ($t=1\times 10^5\text{ min}$)

即随着 r 值的增大, UH 模型参数对孔压大小的影响就越显著。由图 5(b), 6(b), 7(b) 可以看出, 距离排水面越远的区域孔压越大, 但超过一定的距离后, 孔压基本维持恒定。这说明在距地面一定的深度内渗流速度存在较大的竖向分量, 当距离超出此深度以后, 土中水几乎不沿竖向排出, 即砂井较长时可以忽略固结过程中水沿竖向的排出。上述分析与文献 [29] 的结论相似。同时, 这一结论也可从图 8 的孔

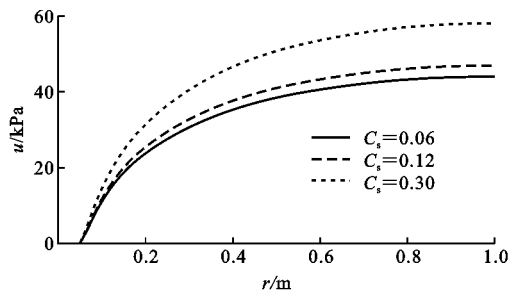
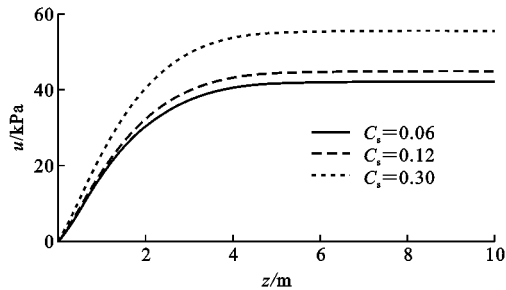
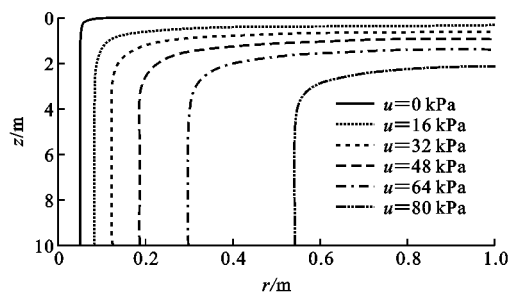
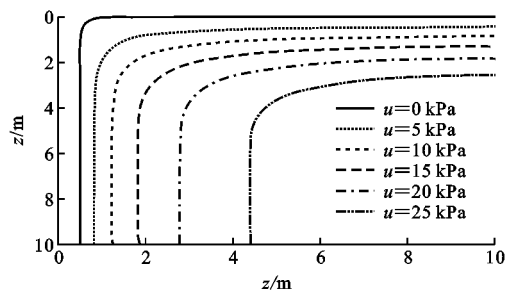
(a) 孔压径向分布($z=8\text{ m}$)(b) 孔压竖向分布($r=0.7\text{ m}$)图7 C_s 对孔压的影响 ($t=1\times 10^5\text{ min}$)Fig. 7 Effect of C_s on Pore Pressure ($t=1\times 10^5\text{ min}$)(a) 考虑土体的黏滞性($C_\alpha=0.04$)(b) 未考虑土体的黏滞性($C_\alpha=0$)图8 砂井影响范围内孔压的等值线图 ($t=5\times 10^4\text{ min}$)

Fig. 8 Contour Map of Pore Pressure in Affect

Area of Sand Drain ($t=5\times 10^4\text{ min}$)

压等值线看出, 在距离地面较远处的孔压等值线几乎都平行于纵坐标轴, 即此处竖向渗流速度很小。对比图 8(a), (b) 可以看出, 在同一位置处, 考虑土体黏滞性时的孔压要大于未考虑黏滞性时的孔压, 即不考虑土体黏滞性会高估砂井地基的固结速率。

4.4 UH 模型参数对固结度的影响

为了研究次固结系数 C_α 对固结度的影响, 图 9

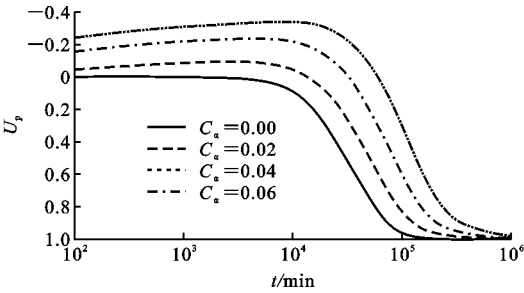


图 9 C_α 对固结度的影响

Fig. 9 Effect of C_α on Degree of Consolidation

给出了不同 C_α 时固结度随时间变化的曲线。可以看出,与未考虑黏滞性相比,随着次固结系数的增大,同一时刻的平均固结度都减小。文献[26]也得出了相同结论,即土体的黏滞性会延缓固结进程。例如, $t=1\times10^5$ min, 不考虑土体的黏滞性时,固结度已达 96.6%, 而考虑土体的黏滞性时,对应于 $C_\alpha=0.02, 0.04, 0.06$ 的固结度仅分别为 83.2%, 61.0%, 29.9%。因此,忽略砂井地基中的黏滞性,将会高估砂井地基的固结进程。

R_0 一定程度上反映了地基的超固结程度,当不考虑流变效应时,其倒数即为超固结比。从图 10 可以看出, R_0 越大,达到同一固结度所需时间越长。例如,当土体正常固结 ($R_0=1.00$) 时,固结度达到 90% 需要的时间为 238 800 min,当土体处于超固结状态时, $R_0=0.75, 0.50$ 对应的固结度达到 90% 需要的时间分别为 209 100, 172 800 min, 分别为正常固结对应时间的 87.6% 和 72.4%。也就是说,随着 R_0 的减小(地基初始超固结程度的提高),整体孔压消散变快,即砂井地基固结变快。

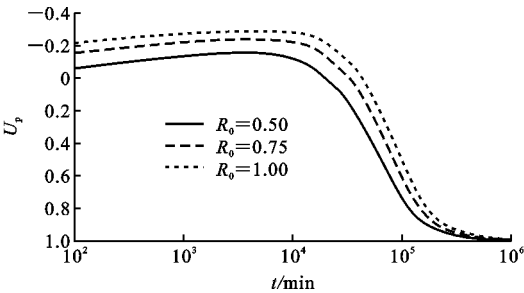


图 10 R_0 对固结度的影响

Fig. 10 Effect of R_0 on Degree of Consolidation

图 11 为回弹指数 C_s 对地基平均固结度的影响曲线。 C_s 与 C_α 和 R_0 对固结度的影响规律基本一致,同一时刻 C_s 越大,平均固结度 U_p 就越小。同时可以看出,相对其他参数, C_s 对固结度的影响相对较小。特别是在固结后期,固结度曲线几乎重合。说明在固结后期, C_s 对砂井地基的固结速率影响

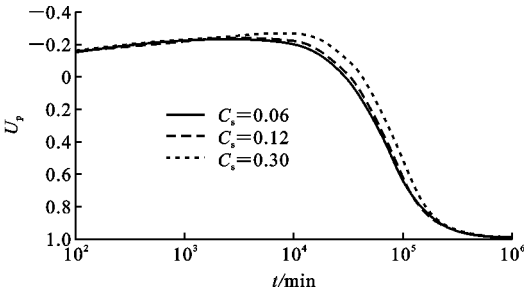


图 11 C_s 对固结度的影响

Fig. 11 Effect of C_s on Degree of Consolidation

很小。

5 结 语

(1) 在施工阶段,砂井地基内出现的孔压升高现象不仅仅是由于施工荷载不断增加造成的。土体的黏滞性或主次耦合机制也会使施工阶段及竣工初期砂井地基内出现孔压升高现象。特别是对于恒载或工期较短的工况,砂井地基较大范围内的孔压峰值甚至可以超过上覆荷载。这是造成施工初期按孔压计算的固结度出现负值的原因。

(2) 考虑施工过程时,随着工期 t_c 的延长,砂井地基内孔压达到峰值需要的时间向后推移,砂井地基的固结进程也变慢。当工期 t_c 较长时,如果将其视为瞬时加载(恒载)的情况,将会产生较大误差。

(3) 基于弹黏塑性本构关系算得的固结速率与上部荷载的大小密切相关。在相同时刻,随着上部荷载的增大,砂井地基内孔压的整体消散速率就增大,即砂井地基的固结进程加快。

(4) 增大 UH 模型参数,砂井地基中孔压的整体消散就会变慢。如果忽略土体的黏滞性,将会高估砂井地基的固结速率。提高地基初始超固结程度将会使砂井地基固结进程变快。另外,相对 UH 模型中的其他参数,回弹指数 C_s 对孔压变化和固结度的影响最小。

(5) 当砂井较长时,可以忽略固结过程中孔隙水沿竖向排出对固结进程的影响,仅以径向固结度表示其固结速率。

参考文献:

References:

[1] BARRON R A. Consolidation of Fine-grained Soils by Drain Wells[J]. Transactions of the American Society of Civil Engineers, 1948, 113(1): 718-742.
[2] HART E G, KONDNER R L, BOYER W C. Analysis for Partially Penetrating Sand Drains[J]. Journal of

- Soil Mechanics and Foundation Division,1958,84(4):1-15.
- [3] YOSHIKUNI H, NAKANODO H. Consolidation of Soils by Vertical Drain Wells with Finite Permeability[J]. Soils and Foundations,1974,14(2):35-46.
- [4] 谢康和,曾国熙. 等应变条件下的砂井地基固结解析理论[J]. 岩土工程学报,1989,11(2):3-17.
XIE Kang-he, ZENG Guo-xi. Consolidation Theories for Drain Wells Under Equal Strain Condition[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,1989,11(2):3-17.
- [5] BASAK P, MADHAV M R. Analytical Solutions of Sand Drain Problem[J]. Journal of Geotechnical Engineering,1978,104(1):129-135.
- [6] LEKHA K R, KRISHNASWAMY N R, BASAK P. Consolidation of Clay by Sand Drain Under Time-dependent Loading[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering,1998,124(1):91-94.
- [7] 刘加才,施建勇,赵维炳,等. 变荷载作用下未打穿竖井地基固结分析[J]. 岩石力学与工程学报,2005,24(6):1041-1046.
LIU Jia-cai, SHI Jian-yong, ZHAO Wei-bing, et al. Consolidation of Ground with Partially Penetrated Vertical Drains Under Time-dependent Loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2005,24(6):1041-1046.
- [8] TANG X W, ONITSUA K. Consolidation by Vertical Drains Under Time-dependent Loading[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics,2000,24(9):739-751.
- [9] 闫富有. 砂井地基径向非线性固结分析[J]. 郑州大学学报:工学版,2007,28(2):35-38.
YAN Fu-you. Analysis of Radial Nonlinear Consolidation of Sand Drain Ground[J]. Journal of Zhengzhou University:Engineering Science,2007,28(2):35-38.
- [10] 周琦,邓志勇,王友元,等. 起始水力梯度对真空预压下砂井地基固结过程的影响[J]. 土木建筑与环境工程,2010,32(2):46-52.
ZHOU Qi, DENG Zhi-yong, WANG You-yuan, et al. Effect of Initial Hydraulic Gradient on Consolidation of Sand-drained Ground Improved by Vacuum Preloading[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering,2010,32(2):46-52.
- [11] 陈国红,谢康和,程永峰,等. 考虑涂抹区渗透系数变化的砂井地基固结解[J]. 浙江大学学报:工学版,2011,45(4):665-670.
CHEN Guo-hong, XIE Kang-he, CHENG Yong-feng, et al. Analytical Solution for Consolidation of Sand-drained Ground Considering Variation of Permeability Coefficient in Smeared Zone[J]. Journal of Zhejiang University:Engineering Science,2011,45(4):665-670.
- [12] 蒋玉坤,孙如华. 深部黏土渗透特性试验研究[J]. 岩土工程学报,2012,34(2):268-273.
JIANG Yu-kun, SUN Ru-hua. Experimental Study on Permeability of Deep Clay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2012,34(2):268-273.
- [13] 夏高翔,周峰,刘加才. 考虑井阻时效的非线性单井地基径向固结解答[J]. 南京工业大学学报:自然科学版,2016,38(4):105-113.
XIA Gao-xiang, ZHOU Feng, LIU Jia-cai. Radical Consolidation Solution of Non-linear Single Sand-drained Foundation Considering Well Resistance Changing with Time[J]. Journal of Nanjing Tech University: Natural Science Edition,2016,38(4):105-113.
- [14] 李西斌,谢康和,陈福全. 考虑软土流变特性和应力历史的一维固结与渗透试验[J]. 水利学报,2013,44(1):18-25.
LI Xi-bin, XIE Kang-he, CHEN Fu-quan. One Dimensional Consolidation and Permeability Tests Considering Stress History and Rheological Characteristic of Soft Soils[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2013,44(1):18-25.
- [15] 刘忠玉,闫富有,王喜军. 基于非达西渗流的饱和黏土一维流变固结分析[J]. 岩石力学与工程学报,2013,32(9):1937-1944.
LIU Zhong-yu, YAN Fu-you, WANG Xi-jun. One-dimensional Rheological Consolidation Analysis of Saturated Clay Considering Non-darcy Flow[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2013,32(9):1937-1944.
- [16] 刘忠玉,杨强. 基于分数阶 Kelvin 模型的饱和黏土一维流变固结分析[J]. 岩土力学,2017,38(12):3680-3687,3697.
LIU Zhong-yu, YANG Qiang. One-dimensional Rheological Consolidation Analysis of Saturated Clay Using Fractional Order Kelvin's Model[J]. Rock and Soil Mechanics,2017,38(12):3680-3687,3697.
- [17] BERRY P L, WILKINSON W B. The Radial Consolidation of Clay Soils[J]. Geotechnique,1969,19(2):253-284.
- [18] 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 Mei-li, QIAN Jia-huan, CHEN Xu-lu. Tests on

- Rheological Behavior of Soft Soil and Rheological Model[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1993, 15(3): 54-62.
- [19] 殷建华, CLARK J I. 土体与时间相关的一维应力-应变性状、弹粘塑性模型和固结分析[J]. 岩土力学, 1994, 15(3): 65-80.
- YIN Jian-hua, CLARK J I. One-dimensional Time Dependent Stress-strain Behaviour of Soil, Elastic Visco-plastic Modelling, and Consolidation Analysis [J]. Rock and Soil Mechanics, 1994, 15(3): 65-80.
- [20] YIN J H, GRAHAM J. Elastic Visco-plastic Modelling of One-dimensional Consolidation [J]. Geotechnique, 1996, 46(3): 515-527.
- [21] 姚仰平. 土的统一硬化模型及其发展[J]. 工业建筑, 2008, 38(8): 1-5.
- YAO Yang-ping. Unified Hardening Model for Soils and Its Development [J]. Industrial Construction, 2008, 38(8): 1-5.
- [22] 姚仰平, 孔令明, 胡 晶. 考虑时间效应的 UH 模型[J]. 中国科学: 技术科学, 2013, 43(3): 298-314.
- YAO Yang-ping, KONG Ling-ming, HU Jing. An Elastic-viscous-plastic Model for Overconsolidated Clays[J]. Scientia Sinica Technologica, 2013, 43(3): 298-314.
- [23] 韩 剑, 姚仰平, 尹振宇. 超固结度对超固结饱和黏土不排水蠕变特性的影响研究[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(3): 426-430.
- HAN Jian, YAO Yang-ping, YIN Zhen-yu. Influences of Overconsolidation Ratio on Undrained Creep Behavior of Overconsolidated Saturated Clay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(3): 426-430.
- [24] TAYLOR D W. Fundamentals of Soils Mechanics [M]. New York: John Wiley & Sons Inc., 1948.
- [25] 耿雪玉. 复杂条件下软粘土地基多维固结分析[D]. 杭州: 浙江大学, 2008.
- GENG Xue-yu. Multi-dimensional Consolidation of Soft Soils Under Complicated Conditions[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2008.
- [26] 胡 晶, 姚仰平. 基于考虑时间效应 UH 模型的一维固结分析[J]. 北京航空航天大学学报, 2015, 41(8): 1492-1498.
- HU Jing, YAO Yang-ping. 1D-consolidation Analysis Based on UH Model Considering Time Effect [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2015, 41(8): 1492-1498.
- [27] 李西斌, 贾献林, 谢康和. 变荷载下软土一维流变固结解析理论[J]. 岩土力学, 2006, 27(增 1): 140-146.
- LI Xi-bin, JIA Xian-lin, XIE Kang-he. Analytical Solution of 1-D Viscoelastic Consolidation of Soft Soils Under Time-dependent Loadings [J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(S1): 140-146.
- [28] 李传勋, 胡安峰, 谢康和, 等. 变荷载下考虑非达西渗流的一维固结半解析解[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(增 2): 3937-3943.
- LI Chuan-xun, HU An-feng, XIE Kang-he, et al. Semi-analytical Solution of One-dimensional Consolidation with Non-darcian Flow Considering Time-dependent Loading [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(S2): 3937-3943.
- [29] 刘忠玉, 焦 阳. 基于 Hansbo 渗流的理想砂井地基固结分析[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(5): 792-801.
- LIU Zhong-yu, JIAO Yang. Consolidation of Ground with Ideal Sand Drains Based on Hansbo's Flow [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(5): 792-801.