

DOI: 10.16285/j.rsm.2015.03.006

基于黏弹性理论的沉桩再固结问题分析

姚文娟, 郭城志, 刘逸敏

(上海大学 土木工程系, 上海 200072)

摘 要: 假设桩周土体为饱和黏弹性介质, 采用 Burgers 流变模型进行描述, 同时考虑竖向和径向固结, 建立了固结控制方程。根据不排水和自由排水情况, 将边界条件分为 3 类并分别得到超孔隙水压力消散的级数解答, 该解答能够为孔压静力触探反求固结系数提供一定的理论依据。在此基础上编制了应用程序, 对 Burgers 流变模型中主要参数进行了分析。结果表明, 地基表面自由排水、桩端地基不排水条件下, 在一定深度以内的桩周土体的固结速度随深度降低, 但超过某一范围后固结速度趋于稳定; 上、下边界均自由排水条件下, 固结速度随深度增加呈现下降、稳定、升高; 上、下边界均不排水条件时, 孔压消散速度不随深度变化, 可简化为本解答仅考虑径向固结的特例。同时土体的流变特性对超孔隙水压力消散的影响比较显著, 流变参数 G_1/η_1 的变化使超孔隙水压力趋于某不为 0 的定值, 且该值随 G_1/η_1 比值的增大而增加; 其他参数不变时, 土体剪切刚度比 G_1/G_2 的增大会引起孔压消散速度的下降。

关 键 词: 沉桩; 软土; 固结; 黏弹性; Burgers 模型

中图分类号: TU473 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-7598 (2015) 03-647-07

Analysis of consolidation around a driven pile based on viscoelasticity theory

YAO Wen-juan, GUO Cheng-zhi, LIU Yi-min

(Department of Civil Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

Abstract: Burgers rheological model is used to establish the consolidation equations with the consideration of vertical and radial consolidations, while soil around pile is assumed to be saturated viscoelastic media. According to free-draining or undrained condition, the boundary condition is divided into three categories. Series solutions for dissipation of excess pore water pressure are obtained. The series solutions can provide theoretical basis for inverse calculation of consolidation coefficient from static cone penetration test. On this basis, application program is compiled to analyze the main parameters of Burgers rheological model. The result shows that the consolidation rate reduces with depth within a certain depth under the conditions of ground surface free-draining and pile tip foundation undrained. But beyond a threshold, consolidation rate tends to stabilize. When both of upper and lower boundaries are under free-draining condition, the consolidation rate with depth will decrease at first, followed by stabilizing, and increase again at the end. When both of upper and lower boundaries are under undrained condition, the dissipation rate of pore pressure no longer changes with the variation of depth, which can be considered as a special circumstance only considering vertical consolidation. Also, the rheological property has great influence on the dissipation rate of excess pore water pressure. The excess pore water pressure tends to a non-zero value with the variation of G_1/η_1 , and the value increases with the increasing of G_1/η_1 . When other parameters are invariant, the dissipation rate of pore pressure decreases with the increasing of G_1/G_2 .

Keywords: penetration of pile; soft soil; consolidation; viscoelasticity; Burgers models

1 引 言

软土地基中沉桩完成后, 由于土的结构性受到破坏, 桩周土体中会产生较大的超孔隙水压力。这种超孔隙水压力的存在和消散会使桩基承载力随时间发生变化, 并对施工现场的建筑物和地下管线造

成不利影响, 故对其消散机制的研究受到了广泛的重视^[1-4]。Randolph^[5]研究发现, 桩基承载力的提高与桩周土体超孔隙水压力消散的速度是一致的, 并用一种类似于 Biot 固结理论的方法, 得到了该问题的数值解法; 唐世栋^[6]、赵明华^[7]等将土体视为弹性介质建立固结控制方程, 结合圆孔扩张理论, 对

收稿日期: 2013-12-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No.11272200)。

第一作者简介: 姚文娟, 女, 1957 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事工程结构的力学、结构与土相互作用、新型材料的力学理论及数值方法研究。E-mail: wenjuan@mail.shu.edu.cn

桩周土体的再固结问题进行了求解; Guo 等^[8]将土体视为 Merchant 三元件模型, 得到了该问题基于黏弹性介质的解答; 刘加才等^[9]研究发现, 仅有限深度范围内孔压消散受竖向固结影响。

合理建立固结控制方程, 对准确求解问题至关重要, 而建立固结方程的关键在于土体本构关系的选取。研究发现, 土体一般都存在黏滞性, 而 Burgers 模型是一种能较好反映流变体黏弹性性质的模型^[10]。加载时, 它表现出瞬时弹性应变及黏滞流动和延滞弹性; 卸载时, 表现出瞬时弹性恢复和弹性后效以及存在永久残余变形。同时还能够反映应力松弛现象, 故能够合理地反映某些地区黏性土的特性^[3, 11]。所以本文将超孔隙水压力消散的解答推广到 Burgers 四元件模型。假定桩周土体为饱和黏弹性介质, 采用 Burgers 四元件流变模型进行描述, 同时考虑径向和竖向固结, 采用分离变量法, 结合 Laplace 变换, 得到孔隙水压力消散的级数解答。并对其不同排水条件以及主要参数进行分析, 得到一些结论可供工程参考。

2 固结控制方程

2.1 计算模型

本文基于 Burgers 四元件模型建立固结控制方程, 研究对象如图 1 所示。

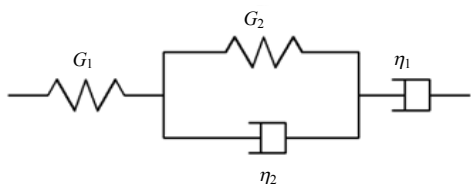


图 1 Burgers 流变模型
Fig.1 Burgers rheological model

其蠕变柔度为

$$F(t) = \frac{1}{G_1} + \frac{1}{\eta_1}t + \frac{1}{G_2}[1 - \exp(-G_2t/\eta_2)] \quad (1)$$

式中: G_1 、 G_2 分别为两弹簧的剪切模量; η_1 、 η_2 为黏壶的黏滞系数。

2.2 固结控制方程的建立

首先在弹性条件下得到体积应变 ε_v 与孔隙水压力 u 的关系为

$$\varepsilon_v = -\frac{3(1-2\nu)}{2G(1+\nu)}(u-u_0) \quad (2)$$

式中: ν 为泊松比; G 为剪切模量; u_0 为初始超孔

隙水压力。

采用 Laplace 变换将体积应变与孔隙水压力间的关系式转换到黏弹性条件下, ε_v 、 $F(t)$ 的 Laplace 变换式如下:

$$\bar{\varepsilon}_v = -\frac{3(1-2\nu)}{2(1+\nu)}\frac{1}{G}(u-u_0) \quad (3)$$

$$\bar{F}(t) = \frac{1}{G_1} \frac{1}{s} + \frac{1}{\eta_1} \frac{1}{s^2} + \frac{1}{s(G_2 + s\eta_2)} \quad (4)$$

$\bar{F}(t)$ 与 $\bar{G}$ 之间存在关系 $\bar{F}(t) = 1/(s\bar{G})$, 可得

$$\bar{\varepsilon}_v = -\frac{3(1-2\nu)}{2(1+\nu)}\frac{1}{G}(u-u_0)s\bar{F}(t) \quad (5)$$

经 Laplace 反演及卷积公式, 可得

$$\varepsilon_v = -\frac{3(1-2\nu)}{2(1+\nu)}\frac{1}{G_1}[(u-u_0) + G_1 \int_0^t (u-u_0) \frac{dF(t-\tau)}{d(t-\tau)} d\tau] \quad (6)$$

两边对 t 求导:

$$\frac{\partial \varepsilon_v}{\partial t} = -\frac{3(1-2\nu)}{2(1+\nu)}\frac{1}{G_1} \left[\frac{\partial u}{\partial t} + G_1 \int_0^t \frac{\partial u}{\partial \tau} \frac{dF(t-\tau)}{d(t-\tau)} d\tau \right] \quad (7)$$

由达西定律以及土中流体的连续性可知,

$$\frac{\partial \varepsilon_v}{\partial t} = -\frac{k_h}{\gamma_w} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial u}{\partial r} \right) - \frac{k_v}{\gamma_w} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad (8)$$

将式 (7) 代入到式 (8), 可得

$$\frac{\partial u}{\partial t} + G_1 \int_0^t \frac{\partial u}{\partial \tau} \frac{dF(t-\tau)}{d(t-\tau)} d\tau = C_h \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial u}{\partial r} \right) + C_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad (9)$$

式中: γ_w 为水的重度; t 为时间; $C_h = \frac{2(1+\nu)G_1}{3(1-2\nu)} \frac{k_h}{\gamma_w}$

为水平固结系数; $C_v = \frac{2(1+\nu)G_1}{3(1-2\nu)} \frac{k_v}{\gamma_w}$ 为竖向固结系

数; k_h 、 k_v 分别为水平、竖向渗透系数。

至此固结控制方程建立完成。

2.3 初始条件

为得到沉桩完成后超孔隙水压力随时间的解答, 需要已知沉桩完成时的初始超孔隙水压力。本文参考文献[9]中采用的关于初始超孔隙水压力的解答:

$$\left. \begin{aligned} u|_{t=0} &= 2c_u \ln(R/r), \quad r_0 \leq r \leq R \\ u|_{t=0} &= 0, \quad R \leq r \leq r_e \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

式中: $R = r_0 \sqrt{\frac{G_1}{c_u}}$ 为塑性区半径; c_u 为桩周土体不排水剪抗剪强度; r_0 为桩径; r_e 为超孔隙水压力分

布半径, 据 Randolph 等研究成果, r_e 一般取 (5~10) $R^{[8]}$ 。

2.4 边界条件

考虑到桩身沉入过程中被一层黏土所覆盖, 大大降低了其渗透性, 本文假定桩孔孔壁为不透水边界并考虑其影响范围, 可得如下径向边界条件:

$$\left. \frac{\partial u}{\partial r} \right|_{r=r_0} = 0 \quad (11)$$

$$u|_{r=r_e} = 0 \quad (12)$$

本文研究单桩沉桩再固结问题, 故取 $r_e=5R$ 能够满足工程精度要求。

假设桩长为 H , 竖向边界条件可分为 3 类: 第 1 类为地基表面为自由排水边界, 桩端地基为不排水边界, 如式 (13); 第 2 类为地基表面为自由排水边界, 桩端地基也为自由排水边界, 如式 (14); 第 3 类为地基表面为不排水边界, 桩端地基也为不排水边界, 如式 (15)。

$$u|_{z=0} = 0, \quad \left. \frac{\partial u}{\partial z} \right|_{z=H} = 0 \quad (13)$$

$$u|_{z=0} = 0, \quad u|_{z=H} = 0 \quad (14)$$

$$\left. \frac{\partial u}{\partial z} \right|_{z=0} = 0, \quad \left. \frac{\partial u}{\partial z} \right|_{z=H} = 0 \quad (15)$$

3 方程的求解

3.1 求解过程

采用分离变量法求解固结控制方程 (9), 令 $u=w(r)Z(z)T(t)$, 可得

$$\begin{aligned} \frac{1}{T} \left[\frac{dT}{dt} + G_1 \int_0^t \frac{dT}{d\tau} \frac{dF(t-\tau)}{d(t-\tau)} d\tau \right] = \\ C_h \left(\frac{1}{r} \frac{\partial \omega}{\partial r} + \frac{1}{\omega} \frac{\partial^2 \omega}{\partial r^2} \right) + C_v \frac{1}{z} \frac{\partial^2 Z}{\partial z^2} \end{aligned} \quad (16)$$

引入常数 λ_1^2 、 λ_2^2 、 λ_3^2 可得

$$\frac{d^2 w}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dw}{dr} + \lambda_1^2 w = 0 \quad (17)$$

$$C_v \frac{1}{z} \frac{\partial^2 Z}{\partial z^2} = -\lambda_2^2 \quad (18)$$

$$\frac{dT}{dt} + G_1 \int_0^t \frac{dT}{d\tau} \frac{dF(t-\tau)}{d(t-\tau)} d\tau + \lambda_{3nm}^2 T = 0 \quad (19)$$

式中: $\lambda_3^2 = C_h \lambda_1^2 + \lambda_2^2$ 。

式 (17) 为零阶 Bessel 函数, 其通解为

$$w_n(r) = A_n J_0(\lambda_{1n} r) + B_n N_0(\lambda_{1n} r) \quad (20)$$

式中: J_0 为零阶 1 类 Bessel 函数; N_0 为零阶 2 类

Bessel 函数; λ_n 为无穷多个正根。

由边界条件式 (11) 及 Bessel 函数性质可得

$$w_n(r) = A_n V_0(\lambda_{1n} r) \quad (21)$$

$$V_0(\lambda_{1n} r) = J_0(\lambda_{1n} r) - \frac{J_1(\lambda_{1n} r_0)}{N_1(\lambda_{1n} r_0)} N_0(\lambda_{1n} r) \quad (22)$$

由边界条件式 (12) 可得

$$V_0(\lambda_{1n} r_e) = J_0(\lambda_{1n} r_e) - \frac{J_1(\lambda_{1n} r_0)}{N_1(\lambda_{1n} r_0)} N_0(\lambda_{1n} r_e) = 0 \quad (23)$$

式中: J_1 为一阶 1 类 Bessel 函数; N_1 为一阶 2 类 Bessel 函数。

对式 (18) 进行求解:

$$Z_m(z) = D_m \sin\left(\sqrt{\frac{\lambda_{2m}^2}{C_v}} z\right) \quad (24)$$

$$\lambda_{2m}^2 = \frac{C_v M_i^2}{H^2}, i=1,2 \quad (25)$$

当为第 1 类边界条件式 (13) 时, 有

$$M_1 = \frac{(2m-1)\pi}{2}, m=1,2,\dots \quad (26)$$

当为第 2 类边界条件式 (14) 时, 有

$$M_2 = (m-1)\pi, m=1,2,\dots \quad (27)$$

当为第 3 类边界条件式 (15) 时, 有

$$M_3 = 0 \quad (28)$$

将式 (19) 进行 Laplace 反演, 并将 $F(t)$ 代入可得

$$G_1(s\bar{T}_{nm} - T_0)[s\bar{F}(s) - F(0) + \frac{1}{G_1}] + \lambda_{3nm}^2 \bar{T}_{nm} = 0 \quad (29)$$

式中: $T_0=1$; $\lambda_{3nm}^2 = C_h \lambda_{1n}^2 + \lambda_{2m}^2$; 可得 $\bar{T}_{nm}$ 表达式为

$$\bar{T}_{nm}(s) = \frac{s^2 + \varphi s + \frac{G_1 G_2}{\eta_1 \eta_2}}{s^3 + (\varphi + \alpha_n^2)s^2 + (\frac{G_1}{\eta_1} + \alpha_n^2)\frac{G_2}{\eta_2}s} \quad (30)$$

式中: $\varphi = \frac{G_1}{\eta_1} + \frac{G_2}{\eta_2}(1 + \frac{G_1}{G_2})$ 。

对 $\bar{T}_{nm}(s)$ 进行 Laplace 反演,

$$\begin{aligned} T_{nm}(t) = \frac{\frac{G_1 G_2}{\eta_1 \eta_2}}{\psi_1^{nm} \psi_2^{nm}} + \frac{1}{\psi_1^{nm} - \psi_2^{nm}} \left[\left(\frac{\eta_1 \eta_2}{\psi_1^{nm}} + \varphi + \psi_1^{nm} \right) \cdot \right. \\ \left. \frac{G_1 G_2}{\psi_2^{nm}} - \left(\frac{\eta_1 \eta_2}{\psi_2^{nm}} + \varphi + \psi_2^{nm} \right) e^{\psi_2^{nm} t} \right] \end{aligned} \quad (31)$$

式中:

$$\psi_1^{nm} = \frac{1}{2} [-(\varphi + \lambda_{3nm}^2) + \sqrt{(\varphi + \lambda_{3nm}^2)^2 - 4 \frac{G_2}{\eta_2} (\frac{G_1}{\eta_1} + \lambda_{3nm}^2)}];$$

$$\psi_2^{nm} = \frac{1}{2} [-(\varphi + \lambda_{3nm}^2) - \sqrt{(\varphi + \lambda_{3nm}^2)^2 - 4 \frac{G_2}{\eta_2} (\frac{G_1}{\eta_1} + \lambda_{3nm}^2)}]$$

综合上述分析, u 可表示为

$$u = \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ A_n V_0(\lambda_{1n} r) \sum_{m=1}^{\infty} \left[D_m \sin(\sqrt{\frac{\lambda_{2m}^2}{C_v}} z) T_{nm}(t) \right] \right\} \quad (32)$$

由初始条件, 柱函数在 $[r_0, r_e]$ 的正交性以及 $\sin(\sqrt{\frac{\lambda_{2m}^2}{C_v}} z)$ 在 $[0, H]$ 的正交性可得:

$$A_n = \frac{\int_{r_0}^{r_e} u_0 V_0(\lambda_{1n} r) r dr}{\int_{r_0}^{r_e} V_0^2(\lambda_{1n} r) r dr} = \frac{4c_u}{\lambda_{1n}^2} \frac{V_0(\lambda_{1n} r_0) - V_0(\lambda_{1n} R)}{r_e^2 V_1^2(\lambda_{1n} r_e) - r_0^2 V_0^2(\lambda_{1n} r_0)} \quad (33)$$

第 1 类边界条件时有

$$D_m = \frac{2}{M_1}, m=1, 2, \dots \quad (34)$$

第 2 类边界条件时有

$$D_m = \frac{2}{M_2} [(-1)^m + 1], m=1, 2, \dots \quad (35)$$

第 3 类边界条件时有

$$\lambda_{2m}^2 = 0 \quad (36)$$

本征值有无穷个解答, 为满足工程精度要求, m, n 取前 50 项进行计算。通过求解式 (33) 得到每一个本征值对应的 A_n , 再求解式 (34) ~ (36) 可得到每个本征值对应的 D_m , 将其代入式 (32) 就可以得到桩侧超孔压消散过程中任意半径、任意深度、任意时刻的超孔隙水压力。

利用桩侧超孔压固结的解答, 结合桩身分布的不同土层物理、力学性质指标, 可推广到桩身不同土层在沉桩后超孔隙水压力随时间和半径的变化。

3.2 解答的验证

当 η_1 趋于无穷时, Burgers 模型退化为 Merchant 模型, 将得到的解答与文献[9]对比。由式 (31) 可得:

$$T_{1nm}(t) = \frac{(\varphi + \omega_1^{1nm}) e^{\omega_1^{1nm} t} - (\varphi + \omega_2^{1nm}) e^{\omega_2^{1nm} t}}{\sqrt{(\varphi + \lambda_{3nm}^2)^2 - 4 \frac{G_2}{\eta_2} \lambda_{3nm}^2}} \quad (37)$$

式中:

$$\psi_1^{1nm} = \frac{1}{2} [-(\varphi + \lambda_{3nm}^2) + \sqrt{(\varphi + \lambda_{3nm}^2)^2 - 4 \frac{G_2}{\eta_2} (\frac{G_1}{\eta_1} + \lambda_{3nm}^2)}];$$

$$\psi_2^{1nm} = \frac{1}{2} [-(\varphi + \lambda_{3nm}^2) - \sqrt{(\varphi + \lambda_{3nm}^2)^2 - 4 \frac{G_2}{\eta_2} (\frac{G_1}{\eta_1} + \lambda_{3nm}^2)}]$$

将式 (37) 代入到式 (32) 中可得

$$u = \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ A_n V_0(\lambda_{1n} r) \sum_{m=1}^{\infty} \left[D_m \sin(\sqrt{\frac{\lambda_{2m}^2}{C_v}} z) T_{nm}(t) \right] \right\} \quad (38)$$

得到的解答与文献[9]一致, 说明本文的理论解是正确的。

4 算例分析

要准确分析土体流变条件下桩周土体固结问题, 土体流变参数的确定是十分重要的。根据前述理论解答, 取桩径 $r_0=0.25$ m, $r_e=12.5$ m, $H=20$ m, 不排水剪抗剪强度 $c_u=40$ kPa, 并令 $a=G_1/\eta_1$ 、 $b=G_2/\eta_2$ 、 $c=G_1/G_2$, 编制应用程序分析流变参数及排水条件变化对超孔隙水压力消散的影响。

4.1 程序正确性的验证

为保证应用程序的可靠性, 将零时刻初始超孔压理论解与本文级数解答进行对比。如图 2 所示, m, n 分别取 10、20、30、50 项进行计算。由图可见, 随着项数的增加, 理论解与级数解曲线吻合程度越来越高。经分析当项数为 20 时, 其误差为 6.95%, 已经能够满足工程要求。当项数为 50 时, 理论解与级数解曲线吻合。

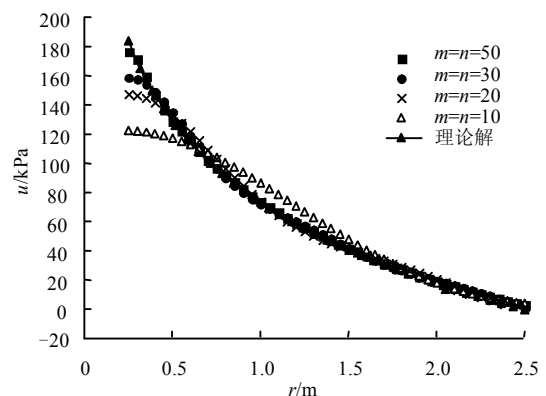


图 2 零时刻初始超孔压理论解与本文解对比

Fig.2 Comparison between solutions in this paper and theoretical values of initial excess pore pressure at zero time

4.2 不同排水条件分析

取桩周土体参数 $G_1=4.0$ MPa, $a=0.005$ /d, $b=0.345$ 6, $c=0.2$, 径向固结系数为 $c_h=0.043$ 2 m²/d, 竖向固结系数 $c_v=0.017$ 28 m²/d。讨论不同排水条件对桩周土体超孔隙水压力消散的影响。

图 3 为 15 d 时桩端不排水和地面自由排水条件下不同深度孔压分布情况。由图可见, 在一定深度内, 残余的孔压随深度的增加而增大, 但超过一定范围之后, 残余孔压的大小基本不随深度变化。说明桩周土体在一定深度以内, 固结速度随深度增大, 但超过某一范围, 固结速度趋于稳定。

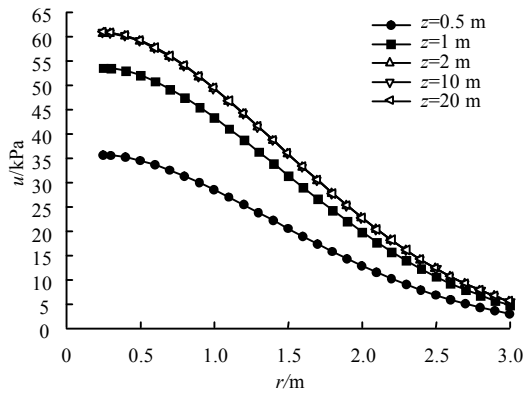


图3 桩端不排水和地面排水条件下不同深度超孔压对比
Fig.3 Comparison of excess pore pressures at different depths under conditions of pile tip undrained and ground free-draining

图4为15 d时桩端及地面均自由排水条件下不同深度孔压分布情况。由图可见,在一定范围以内,固结速度随深度同样呈现下降、稳定的趋势,但在接近桩端的某一深度以下,固结速度再次升高。同时比较两图同一深度的孔压可知,桩端自由排水比桩端不排水的稳定固结速度小。分析两者差异的原因,是由于边界条件仅为地面排水而桩端不排水时,超孔隙水压力以径向消散为主,桩端和地面均排水条件下,径向消散和竖向消散均为主,而竖向排水能力的加强会抑制孔压沿径向的消散,这种相互耦合的作用会导致某些深度范围内整体孔隙水压力消散速度变得缓慢。正是由于这种消散速度的减缓,使得在条件一致的情况下,上、下边界均排水的孔压大于桩端不排水条件下的孔压。

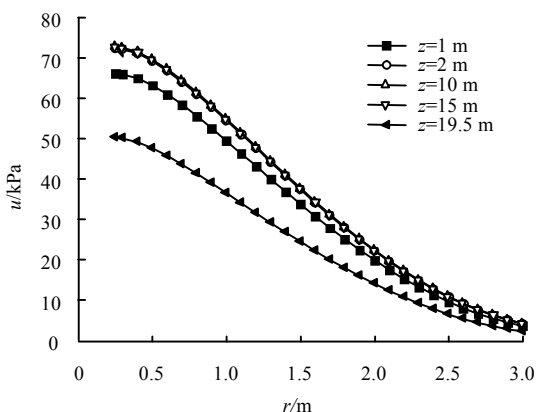


图4 桩端及地面均排水条件下不同深度超孔压对比
Fig.4 Comparison of excess pore pressures at different depths under conditions of pile tip and ground free-draining

当排水条件为地基表面及桩端边界均不排水时,由式(36)中本征值 $\lambda_{2m}=0$ 可知,此时为式(36)仅考虑径向排水的特例,即消散速度沿深度方向没

有变化。

图5为桩侧超孔隙水压力随时间变化情况。由图中可见,随着时间的推移,桩侧超孔隙水压力分布区域越来越大,分布也趋于平均,呈现前期消散快,中后期消散速度逐渐变慢。

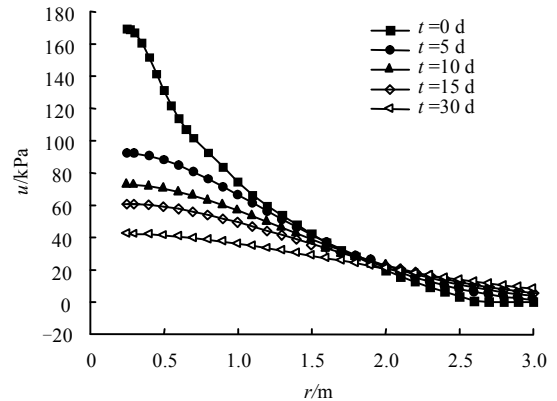


图5 桩端及地面均不排水时超孔压随时间的变化情况
Fig.5 Variation of excess pore pressure with time under conditions of pile tip and ground undrained

4.3 蠕变参数分析

若土体其他参数与前面相同,分别取参数 $a=0/d$ 、 $0.005/d$ 、 $0.01/d$ 、 $0.015/d$,其中 $a=0$ 时,模型即为 Merchant 模型,比较不同土体蠕变参数情况下, $z=5$ m处桩-土界面超孔隙水压力的变化情况。

经分析在该深度时,不同排水条件对孔压变化的趋势无明显影响,故仅采用第1类边界条件对蠕变参数的影响进行讨论。桩-土界面超孔压随时间消散如图6所示,上述4种情况下30 d时桩侧超孔隙水压力消散程度分别为77.5%、75.4%、73.4%、71.5%。且其他条件不变时,随着 a 值的增加,超孔隙水压力消散的趋势不变,但最终不再趋于0,而是趋于一定值,且该值随着 a 增加而增大。

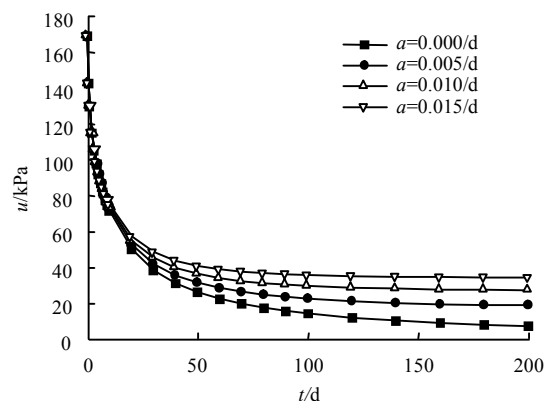


图6 $z=5$ m处桩-土界面上超孔压随时间的变化情况
Fig.6 Variation of excess pore pressure at the pile-soil interface with time when $z=5$ m

取蠕变参数 $c=0.00$ 、 0.75 、 1.50 ，比较在不同剪切刚度比的情况下 $z=5$ m 处桩-土界面超孔隙水压力的变化情况。若此时取 $a=0.005/d$ ， $b=0.3456/d$ ，结果如图 7 所示，由于 a 值保持不变，超孔隙水压力消散趋于某一定值，且该值不受 c 值变化的影响。但 c 值对超孔隙水压力消散的速度有一定影响，当 c 较小时，超孔隙水压力的消散速度最快，随着 c 的增加，消散速度逐渐变慢。上述 3 种情况中超孔隙水压力消散程度为 80% 时，所需的时间约为 35、65、90 d。

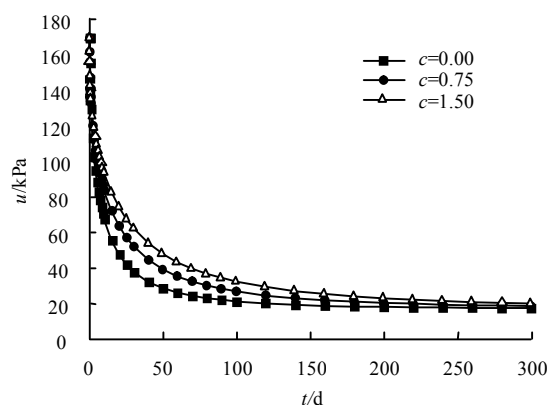


图 7 桩-土界面上超孔压随时间的变化($a=0.005$, $b=0.3456$)
Fig.7 Variation of excess pore pressure at the pile-soil interface with time when $a=0.005$, $b=0.3456$

4 结 论

(1) 地基表面自由排水、桩端不排水条件下，桩周土体在一定深度以内，固结速度随深度增加而降低，但超过某一范围，固结速度趋于稳定；上下边界均自由排水条件下，在一定范围以内，固结速度随深度同样呈现下降、稳定的趋势，但在接近桩端的某一深度以下，固结速度再次升高。同时比较两图同一深度的孔压可知，桩端自由排水比桩端不排水的稳定固结速度小。

(2) 地基表面和桩端边界均不排水条件下，超孔隙水压力消散的速度不随深度变化，可简化为本解答仅考虑径向固结的特例。随着时间的推移，桩侧超孔隙水压力分布区域越来越大，分布也趋于平均，呈现前期消散快，中后期消散速度逐渐变慢。

(3) 土体的流变特性对超孔隙水压力消散的影响比较显著。当 G_2/η_2 、 G_1/G_2 不变时，随着 G_1/η_1 的增大，超孔隙水压力随时间消散不再趋于 0，而是趋于一个定值，且该值随 G_1/η_1 的增加而增大。

(4) 土体的剪切刚度比值 G_1/G_2 对超孔隙水压力消散也有一定影响。当 G_1/η_1 、 G_2/η_2 不变时，随着 G_1/G_2 的增加，消散速度逐渐变慢。

参 考 文 献

- [1] 曹权, 施建勇, 雷国辉, 等. 软土中单桩桩侧承载力时效性理论解[J]. 岩土力学, 2011, 32(12): 3604—3610.
CAO Quan, SHI Jian-yong, LEI Guo-hui, et al. Theoretical solution for time effect of shaft bearing capacity of single pile in soft soils[J]. *Rock and soil Mechanics*, 2011, 32(12): 3604—3610.
- [2] 王伟, 卢廷浩, 宰金珉, 等. 基于超静孔压消散的静压桩极限承载力研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(11): 1427—1434.
WANG Wei, LU Ting-hao, ZAI Jin-min, et al. Study of ultimate bearing capacity of static pressed pile based on excess pore water pressure dissipation[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2005, 26(11): 1427—1434.
- [3] 王旭东, 王伟, 宰金珉. 沉桩引起的超孔隙水压力及其消散的三维解析解[J]. 南京工业大学学报(自然科学版), 2002, 14(6): 16—19.
WANG Xu-dong, WANG Wei, ZAI Jin-min. An analytical solution for the excess pore water pressure dissipation around a driven pile[J]. *Nanjing University of Technology*, 2002, 14(6): 16—19.
- [4] 姚笑青, 胡中雄. 饱和软土中沉桩引起的孔隙水压力估算[J]. 岩土力学, 1997, 18(4): 30—35.
YAO Xiao-qing, HU Zhong-xiong. The estimation of the excess pore water pressure in saturated soft[J]. *Rock and soil Mechanics*, 1997, 18(4): 30—35.
- [5] RANDOLPH M F, WROTH C P. An analytical solution for the consolidation around a driven pile[J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 1979, (3): 217—219.
- [6] 唐世栋, 朱小林. 孔隙水压力对静力触探成果的影响[J]. 工程勘察, 1990, (6): 14—18.
TANG Shi-dong, ZHU Xiao-lin. The influence of the excess pore water pressure on cone penetration tests[J]. *Engineering Investigation*, 1990, (6): 14—18.