

文章编号: 1000-0887(2004) 08-0855-08

变荷载下半透水边界成层地基的一维固结^{*}

蔡袁强¹, 梁 旭^{1,2}, 吴世明¹

(1. 浙江大学 岩土工程研究所, 杭州 310027;

(2. 杭州市建设委员会, 杭州 310027)

(陈正汉推荐)

摘要: 在 Terzaghi 一维固结理论假设基础上, 研究分析了半透水边界的层状饱和土在变荷载作用下有效应力比的变化规律。利用 Laplace 变换, 得到了随时间任意变化荷载作用下的解答, 并结合 Laplace 逆变换方法, 对几种常见变荷载作用下的情况进行了讨论, 得到了一些有益的结论。通常所研究的透水或不透水边界条件只是该文的特例。和平均指标法相比, 该文所给方法计算的土体有效应力变化规律更精确。

关键词: 一维固结; 半透水边界; 成层地基; 变荷载; Laplace 变换; 有效应力比; 平均指标法

中图分类号: TU470 **文献标识码:** A

引 言

公路、贮油罐、堆场以及摆放振动机器的地基经常承受着变载的作用, 如何计算在变载作用下的地基的沉降是一个需要解决的实际问题。处理这种地基时, 常常在土层顶面铺上垫层以加快其排水速度, 求解时, 将该垫层作为透水边界。然而当垫层透水性不良时, 在紧紧相邻的土层顶面形成半透水边界条件。以往对问题进行研究时, 往往都是针对单层均质地基的情况进行的, 而实际上天然地基大多是由性状不一的层状土组成的。

Terzaghi^[1]建立了经典的一维固结理论。之后, Schiffman^[2]考虑了随时间呈线性增长的荷载情况下问题的解, Wilson^[3]等研究了矩形波形荷载下的饱和粘土一维固结问题, Alonso^[4]等分析了随机荷载作用下弹性粘土层的沉降, Baligh^[5]对迭加原理对比作了非线性分析, 吴世明^[6]等推导了积分形式表达的任意荷载的一维固结方程的通解, 谢康和^[7]研究了多层地基在简单变荷载作用下的固结问题, 蔡袁强^[8]等得到了成层饱和地基在周期荷载下有效应力的解答, Pyrah^[9]研究了成层土的固结问题, G. Zhu^[10]研究了双层土在随深度变化的荷载下的固结问题。Gray^[11], Schiffman^[2], 谢康和^[12], 王奎华^[13]等对静载作用下半透水地基的固结问题进行了研究。但对于变荷载作用下半透水边界成层地基的固结问题还很少见诸文献。因此本文对该

* 收稿日期: 2002_11_20; 修订日期: 2004_04_09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(59908012)

作者简介: 蔡袁强(1965—), 男, 浙江诸暨人, 教授, 博士(联系人, Tel: + 86_571_87952619; E_mail: caiyq@civil.zju.edu.cn);

梁旭(1975—), 男, 江苏盐城人, 博士(Tel: + 86_571_87952619; E_mail: liangxu1999@163.net)。

问题进行了研究,利用 Laplace 变换,得到时域内的通解,结合 Laplace 逆变换方法,结合算例进行讨论。结果表明,半透水条件下地基的应力增长规律和透水或不透水情况时明显的不同。

1 固结方程及其通解

图 1 为本文拟求解的层状土在半透水边界条件下的固结问题计算模型。图中, k_i 、 C_{vi} 、 E_{si} 分别表示第 i 层饱和软粘土的渗透系数、固结系数和压缩模量。 L_t 、 L_b 、 k_t 、 k_b 分别为上下卧层的厚度和渗透系数, $q(t)$ 为随时间而变化的外加荷载。

设地表荷载随时间变化,其余采用 Terzaghi 一维固结理论中的假设,成层地基的一维固结方程可表示为:

$$\frac{\partial \sigma_i(z, t)}{\partial t} = C_{vi} \frac{\partial^2 \sigma_i(z, t)}{\partial z^2}, \quad (1)$$

式中: $\sigma_i(z, t)$ 是第 i 层土中深度 z 处 t 时刻相对于初始有效应力的有效应力增量(简称有效应力), $C_{vi} = (k_i \times E_{si}) / \gamma_w$, 其中 γ_w 为水的密度。

对式 (1) 进行 Laplace 变换可得:

$$s \sigma_i(z, s) - \sigma_i(z, 0) = C_{vi} \frac{\partial^2 \sigma_i(z, s)}{\partial z^2}, \quad (2)$$

式中, $\sigma_i(z, s)$ 是 $\sigma_i(z, t)$ 的 Laplace 变换象函数, s 为 Laplace 变换参数。

对于双面半透水地基,问题的初值条件和边界条件为:

$$\sigma_i(z, 0) = 0, \quad 0 \leq z \leq h_n, \quad t = 0, \quad (3)$$

$$\frac{\partial \sigma_1(z, t)}{\partial z} + \frac{R}{h_n} [q(t) - \sigma_1(z, t)] = 0, \quad z = 0, \quad t > 0, \quad (4)$$

$$\frac{\partial \sigma_n(z, t)}{\partial z} - \frac{R'}{h_n} [q(t) - \sigma_n(z, t)] = 0, \quad z = h_n, \quad t > 0, \quad (5)$$

上式中,

$$R = \frac{k_t h_n}{k_1 L_t}; \quad R' = \frac{k_b h_n}{k_n L_b}.$$

式(2)的解为:

$$\sigma_i(z, s) = R_{i1} e^{\beta_i z} + R_{i2} e^{-\beta_i z}, \quad \beta_i = \sqrt{\frac{s}{C_{vi}}}; \quad (6)$$

层与层之间存在着以下的连续条件:

应力连续:

$$\sigma_i(z, t) |_{z=h_i} = \sigma_{i+1}(z, t) |_{z=h_i}; \quad (7)$$

流量连续:

$$\frac{k_i}{\gamma_w} \frac{\partial \sigma_i}{\partial z} \Big|_{z=h_i} = \frac{k_{i+1}}{\gamma_w} \frac{\partial \sigma_{i+1}}{\partial z} \Big|_{z=h_i} \quad (i = 1, 2, \dots, n-1). \quad (8)$$

将(4)、(5)、(7)、(8)分别进行 Laplace 变换有:

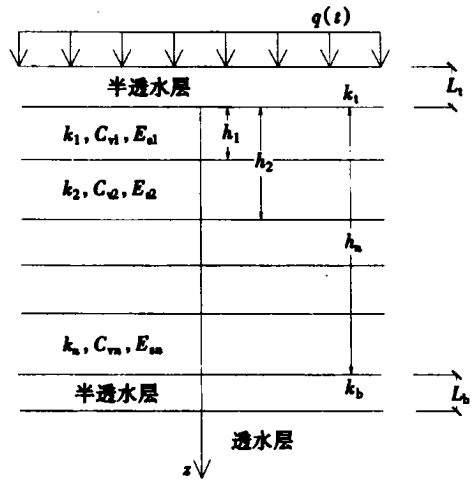


图 1 地基模型计算简图

$$\frac{\partial \sigma_1(0, s)}{\partial z} + \frac{R}{h_n} [Q(s) - \sigma_1(0, s)] = 0, \quad (9)$$

$$\frac{\partial \sigma_n(h_n, s)}{\partial z} - \frac{R'}{h_n} [Q(s) - \sigma_n(h_n, s)] = 0, \quad (10)$$

$$\sigma_i(z, s) |_{z=h_i} = \sigma_{i+1}(z, s) |_{z=h_i},$$

即 $R_{i1} e^{\beta_i h_i} + R_{i2} e^{-\beta_i h_i} = R_{i+1,1} e^{\beta_{i+1} h_i} + R_{i+1,2} e^{-\beta_{i+1} h_i}, \quad (11)$

$$k_i \beta_i (R_{i1} e^{\beta_i h_i} - R_{i2} e^{-\beta_i h_i}) = k_{i+1} \beta_{i+1} (R_{i+1,1} e^{\beta_{i+1} h_i} - R_{i+1,2} e^{-\beta_{i+1} h_i}), \quad (12)$$

其中 $Q(s)$ 是 $q(t)$ 的 Laplace 变换函数。由 (11)、(12) 式可得:

$$[D_{i+1}] = [M_i] [D_i], \quad (13)$$

其中 $[D_i]$ 为第 i 层的应力解系数矩阵。

$$[D_i] = \begin{bmatrix} R_{i1} \\ R_{i2} \end{bmatrix}, \quad [M_i] = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} (1 + \alpha_i) e^{(\beta_i - \beta_{i+1}) h_i}, (1 - \alpha_i) e^{-(\beta_i + \beta_{i+1}) h_i} \\ (1 - \alpha_i) e^{(\beta_i + \beta_{i+1}) h_i}, (1 + \alpha_i) e^{-(\beta_i - \beta_{i+1}) h_i} \end{bmatrix}, \quad (14)$$

其中 $\alpha_i = (k_i \beta_i) / (k_{i+1} \beta_{i+1})$; 由 (13) 递推可得:

$$[D_i] = [M_i] [D_i], \quad \text{其中 } [M_i] = [M_{i-1}] [M_{i-2}] \dots [M_1] \quad (i = 2, \dots, n).$$

将 (6) 代入 (9)、(10) 后化简可得以下式 (15) 和 (16):

$$R_{11} \left(1 - \frac{\beta_1 h_n}{R} \right) + R_{12} \left(1 + \frac{\beta_1 h_n}{R} \right) = Q(s)$$

即 $\left[1 - \frac{\beta_1 h_n}{R}, 1 + \frac{\beta_1 h_n}{R} \right] \begin{bmatrix} R_{11} \\ R_{12} \end{bmatrix} = Q(s); \quad (15)$

$$R_{n1} e^{\beta_n h_n} \left(1 + \frac{\beta_n h_n}{R'} \right) + R_{n2} e^{-\beta_n h_n} \left(1 - \frac{\beta_n h_n}{R'} \right) = Q(s)$$

即 $\left[e^{\beta_n h_n} \left(1 + \frac{\beta_n h_n}{R'} \right), e^{-\beta_n h_n} \left(1 - \frac{\beta_n h_n}{R'} \right) \right] \begin{bmatrix} R_{n1} \\ R_{n2} \end{bmatrix} = Q(s).$ (16)

由 (16) 可得:

$$\left[e^{\beta_n h_n} \left(1 + \frac{\beta_n h_n}{R'} \right), e^{-\beta_n h_n} \left(1 - \frac{\beta_n h_n}{R'} \right) \right] [M_i] [D_i] = Q(s). \quad (17)$$

令

$$[M_n] = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{bmatrix}, \quad 1 - \frac{\beta_1 h_n}{R} = \eta_1, \quad 1 + \frac{\beta_1 h_n}{R} = \eta_2,$$

$$e^{\beta_n h_n} \left(1 + \frac{\beta_n h_n}{R'} \right) = \eta_3, \quad e^{-\beta_n h_n} \left(1 - \frac{\beta_n h_n}{R'} \right) = \eta_4,$$

联立 (15) 和 (17) 可解得

$$[D_i] = \begin{bmatrix} R_{i1} \\ R_{i2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{[-\eta_2 + \eta_3 m_{12} + \eta_4 m_{22}]}{\eta_1 \eta_4 m_{22} + \eta_1 \eta_3 m_{12} - \eta_2 \eta_3 m_{11} - \eta_2 \eta_4 m_{21}} Q(s) \\ \frac{[\eta_1 - \eta_3 m_{11} - \eta_4 m_{21}]}{\eta_1 \eta_4 m_{22} + \eta_1 \eta_3 m_{12} - \eta_2 \eta_3 m_{11} - \eta_2 \eta_4 m_{21}} Q(s) \end{bmatrix}, \quad (18)$$

由此可得各层应力的 Laplace 变换解为:

$$\sigma_i(z, s) = [e^{\beta_i z}, e^{-\beta_i z}] [M_i] [D_i]. \quad (19)$$

将式 (19) 作 Laplace 逆变换:

$$\sigma_i(z, t) = \frac{1}{2\pi i} \int_{a-i\infty}^{a+i\infty} \sigma_i(z, s) e^{st} ds, \quad i = \sqrt{-1}.$$

当 $\sigma_i(z, t)$ 的表达式比较复杂时, 解析解往往很难求得, 对于数值 Laplace 逆变换问题,

Durbin^[14]进行了深入而细致的研究。在以下的叙述中,因为有效应力的解析表达式难以求出,采用 Durbin 所提出的数值 Laplace 逆变换方法。利用自编的程序,结合算例,讨论了各种参数对土体中有效应力比变化 $\sigma_{esr}(= \sigma_i(z, t)/\sigma_0)$ 的影响。

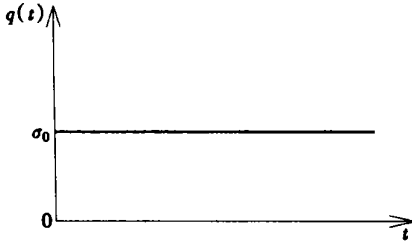


图 2a 骤加恒载

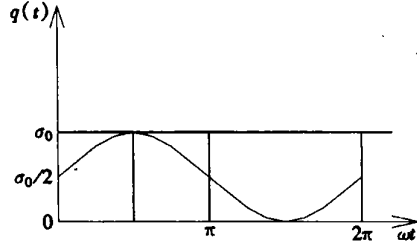


图 2b 正弦波形荷载

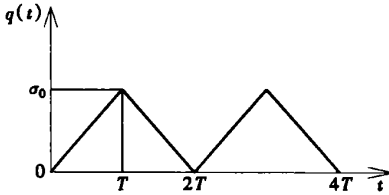


图 2c 三角形荷载

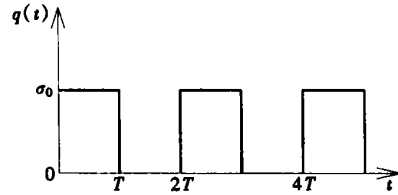


图 2d 矩形荷载

2 常见的变荷载及 Laplace 变换

2.1 骤加恒载作用下的情况

所加荷载如图 2a 所示,

$$q(t) = \sigma_0, \quad t > 0, \quad (20)$$

Laplace 变换为:

$$Q(s) = \frac{\sigma_0}{s}. \quad (21)$$

当 $R, R' \rightarrow \infty$ 时,意味着此时是完全透水的边界条件,此时, $\eta_1 = \eta_2 = 1, \eta_3 = e^{\beta_n h_n}, \eta_4 = e^{-\beta_n h_n}$. 单层地基时, $E_{si} = E_{si+1}, k_i = k_{i+1}$, 可知 $\beta_{i+1} = \beta_i (i = 1, \dots, n-1) \dots$, 故而:

$$[M_i] = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, [M_i] = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, [D_i] = [D_i] \quad (i = 2, \dots, n),$$

显而易见 $m_{11} = m_{22} = 1, m_{12} = m_{21} = 0$. 设 $h_n = 2H$, 可得:

$$\sigma(z, s) = \left[\frac{e^{\beta z}}{1 + e^{2\beta H}} + \frac{e^{-\beta z}}{1 + e^{-2\beta H}} \right] Q(s) = \frac{\operatorname{ch}\beta z + \operatorname{ch}\beta(z - 2H)}{1 + \operatorname{ch}\beta \times 2H} Q(s), \quad (22)$$

经过 Laplace 逆变换可得:

$$\sigma(z, t) = \sigma_0 \left[1 + \frac{4}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n} \sin \frac{n\pi}{2} \cos \left[\frac{z - H}{2H} n\pi \right] \exp \left[-\frac{C_v}{4H^2} n^2 \pi^2 t \right] \right], \quad (23)$$

$$U(z, t) = \left[1 + \frac{4}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n} \sin \frac{n\pi}{2} \cos \left[\frac{z - H}{2H} n\pi \right] \exp \left[-\frac{C_v}{4H^2} n^2 \pi^2 t \right] \right]. \quad (24)$$

整个土层的平均固结度为:

$$U(t) = 1 - \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{M} \exp(-M^2 T_v), \quad M = \frac{\pi}{2}(2m+1), \quad T_v = \frac{C_v t}{4H^2}. \quad (25)$$

可见, 此情况下本文方法导出的解答与 Terzaghi 的理论解完全一致。

2.2 正弦波形荷载作用下的情况

所加荷载如图 2b 所示,

$$q(t) = \sigma_0(1 + \sin \omega t), \quad t > 0, \quad (26)$$

Laplace 变换式为:

$$Q(s) = \sigma_0 \left[\frac{1}{s} + \frac{\omega}{s^2 + \omega^2} \right]. \quad (27)$$

2.3 三角形荷载作用下的情况

所加荷载如图 2c 所示,

$$q(t) = \begin{cases} \frac{\sigma_0}{T} t, & 0 < t < T, \\ \frac{\sigma_0}{T}(2T - t), & T < t < 2T, \end{cases} \quad (28)$$

$$q(t + 2T) = q(t),$$

Laplace 变换式为:

$$Q(s) = \frac{\sigma_0}{T^2} \text{th} \frac{Ts}{2}. \quad (29)$$

2.4 矩形荷载作用下的情况

所加荷载如图 2d 所示

$$q(t) = \begin{cases} \sigma_0, & 0 < t < T, \\ 0, & T < t < 2T, \end{cases} \quad (30)$$

$$q(t + 2T) = q(t),$$

Laplace 变换式为:

$$Q(s) = \frac{\sigma_0}{2s} \left[1 + \text{th} \frac{Ts}{2} \right]. \quad (31)$$

3 算例分析

如图 1 所示, 某地基土层参数如下: $h_1 = 4 \text{ m}$, $h_2 = 10 \text{ m}$, $L_1 = L_b = 0.5 \text{ m}$, $k_t = 8 \times 10^{-7} \text{ m/s}$, $k_b = 8 \times 10^{-7} \text{ m/s}$, $k_1 = 7 \times 10^{-9} \text{ m/s}$, $k_2 = 3 \times 10^{-9} \text{ m/s}$, $E_{s1} = 6 \text{ MPa}$, $E_{s2} = 3 \text{ MPa}$, $T = 20 \text{ d}$ 。讨论不同形式荷载下有效应力 $\sigma_{\text{est}} (= \alpha_i(z, t) / \sigma_0)$ 的变化情况。

对于多层地基, 以往经常采用平均指标法进行计算:

$$k = \frac{\left(\sum_{i=1}^n h_i \right)}{\left(\sum_{i=1}^n \frac{h_i}{k_i} \right)}, \quad \overline{E_s} = \frac{\left(\sum_{i=1}^n h_i \right)}{\left(\sum_{i=1}^n \frac{h_i}{E_{si}} \right)}.$$

上述双层地基按平均指标法可计算得: $k = 3.89 \times 10^{-9} \text{ m/s}$, $\overline{E_s} = 3.75 \text{ MPa}$ 。

图 3 和图 4 为在骤加恒载作用下, 双层地基采用平均指标法和本文所给方法计算所得的在 $z = 3.5 \text{ m}$ 和 6.5 m 处的有效应力随时间增长的变化曲线。由计算结果可以看出: $z = 3.5 \text{ m}$ 处, 所计算土体处于第一层中, 用本文算法计算有效应力 σ_{est} 的增长要快于采用平均指标法的计算结果; $z = 6.5 \text{ m}$ 处, 所计算土体处于第二层中, 本文算法计算有效应力的增长要慢于采用平均指标法的计算结果。但随着时间的推移, 两种方法的计算值都逐渐趋向于某一相同

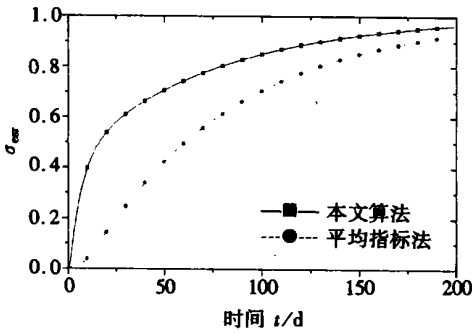


图3 不同算法计算的 $z = 3.5\text{ m}$ 处的有效应力比

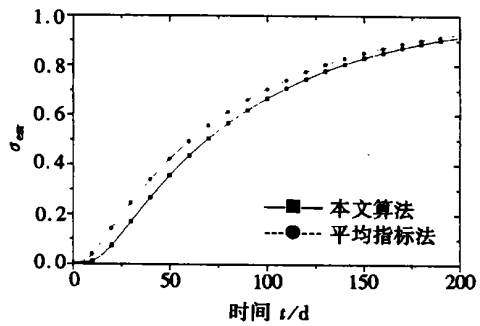


图4 不同算法计算的 $z = 6.5\text{ m}$ 处的有效应力比

值。主要原因在于: 本文所考虑地基中的两点与半透水边界的距离相同, 计算有效应力 σ_{esr} 时, 在其它土性参数都相同的情况下, 模量 (E_{si}) 和渗透系数 (k_i) 的大小决定了有效应力变化的快慢。平均指标法求得的 $\bar{E}_s(k)$ 比第一层土的 $E_{s1}(k_1)$ 小, 而比第二层土的 $E_{s2}(k_2)$ 大, 于是出现了如图 3 和图 4 的结果。

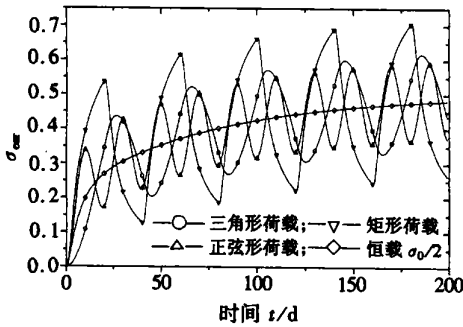


图5 变荷载下 3.5 m 处有效应力 σ_{esr} 变化曲线

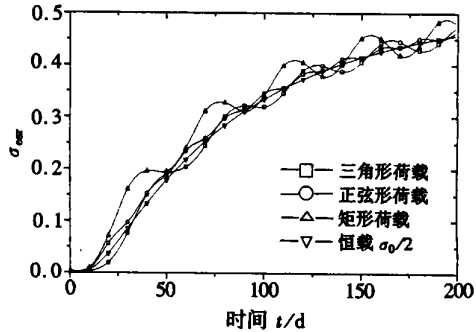
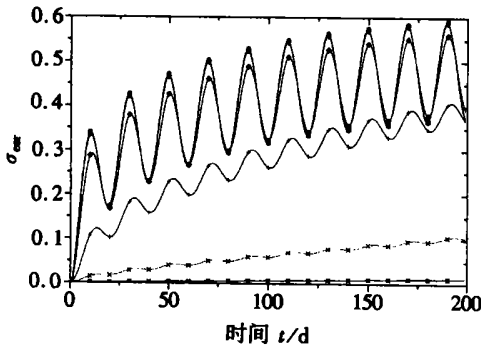


图6 变荷载下 6.5 m 处有效应力 σ_{esr} 变化曲线

图 5 和图 6 表示的是双层地基中不同深度的两点 ($z = 3.5\text{ m}$ 和 6.5 m) 处在不同波形的荷载下有效应力比随时间的变化曲线。可以看出两点 σ_{esr} 的变化是明显不同的。两点分别位于土质参数不同的土层内, 至排水边界的距离相等。利用本文的方法可以准确地计算出在任意时间地基中任意一点的 σ_{esr} 。地基中某一点的应力变化值与该点的 C_v 有关。 C_v 值越大, 该点的固结速度越快。如图 5、图 6 所示, 在相同的矩形荷载下, 在 $z = 3.5\text{ m}$ 处初次有效应力最大值的出现时间明显早于 $z = 6.5\text{ m}$ 处的出现时间, 其它类型的变荷载作用时也有相类似的结论。

图 7 和图 8 表示的是在相同参数的正弦形荷载作用下不同渗透系数时地基中排水距离相同的两点有效应力变化曲线。可以看出, 尽管有着相同的排水距离, 两点 σ_{esr} 的变化明显不相同, 垫层的渗透系数比较大时, 土体中 σ_{esr} 相对于外加荷载变化的滞后时间也变小。还可以看出: 当上下垫层接近不排水时, 土体的 σ_{esr} 增长速度很慢, 由于孔隙水的存在, 其变化幅度几乎为零, 曲线退化为一斜率近似为零的直线。计算表明, 当 R 和 R' 值大于 50 时, 可以处理为透水地基, 当 R 和 R' 值小于 0.02 时, 可以处理为不透水地基。由图可见, 边界条件对地基中 σ_{esr} 的影响是很大的。目前很多实际工程问题中的固结计算, 一般都笼统地处理为透水边界

或不透水边界,但很多都是半透水边界的情况,应根据边界的排水条件,相邻土层的渗透系数选择合适的边界参数 R 和 R' ,按半透水边界处理更符合实际情况。



—■— $k_t = k_b = 8 \times 10^{-5} \text{ m/s}$; —●— $k_t = k_b = 8 \times 10^{-6} \text{ m/s}$; —▲— $k_t = k_b = 8 \times 10^{-7} \text{ m/s}$;
—▼— $k_t = k_b = 8 \times 10^{-8} \text{ m/s}$; —◆— $k_t = k_b = 8 \times 10^{-9} \text{ m/s}$; —+— $k_t = k_b = 8 \times 10^{-10} \text{ m/s}$;
—×— $k_t = k_b = 8 \times 10^{-11} \text{ m/s}$; —*— $k_t = k_b = 8 \times 10^{-12} \text{ m/s}$; —— $k_t = k_b = 8 \times 10^{-13} \text{ m/s}$;

图7 不同渗透系数时 $z = 3.5 \text{ m}$ 处有效应力比变化曲线

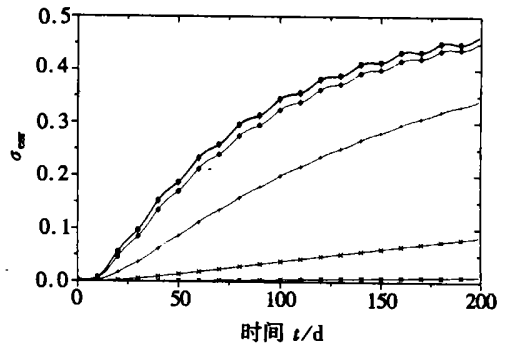


图8 不同渗透系数时 $z = 6.5 \text{ m}$ 处有效应力比变化曲线

以上是针对正弦荷载而言的,对于文中所提及的其它周期荷载,也有相类似的规律,在此不一赘述。

4 结 论

1. 文中所给出的方法可以计算不同透水边界条件的任意多层地基在随时间变化的荷载作用下 σ_{est} 的变化情况。只需求出其 Laplace 变换式,结合自编程序,便可求解。
2. 当边界条件不同时,计算所得的有效应力差别较大。在实际工程计算中,应根据土层和垫层的具体情况,确定边界条件究竟属于完全透水、半透水或者不透水,从而得到更为准确的结果。
3. 在所有的荷载作用下,土体中的 σ_{est} 都最终趋向于一稳定值。周期荷载作用下土体中的 σ_{est} 的变化有相对荷载滞后的现象。土层的压缩模量和垫层的渗透系数越大,有效应力的变化幅值也越大,相对外加荷载变化的滞后时间变短。
4. 相对于平均指标法而言,本文所给方法可以更精确地计算地基土的应力变化 σ_{est} 。

[参 考 文 献]

- [1] Terzaghi K. Theoretical Soil Mechanics [M]. New York, N Y: John Wiley and Sons Inc, 1943.
- [2] Schiffman R L, Stein J R. One dimensional consolidation of layered systems[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, 1970, 96(4): 1499—1504.
- [3] Wilson N E, Elgohary M M. Consolidation of soils under cyclic loading[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1974, 2(3): 420—423.
- [4] Alonso E E, Krizek R J. Randomness of settlement rate under stochastic load[J]. Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE, 1974, 100(6): 1211—1226.
- [5] Baligh M M, Levadoux J N. Consolidation theory for cyclic loading[J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, 1978, 104(4): 415—431.
- [6] 吴世明,陈龙珠,杨丹.周期荷载作用下饱和粘土的一维固结[J].浙江大学学报,1988,22(5): 60—

- 70.
- [7] 谢康和, 潘秋元. 变荷载下任意层地基一维固结理论[J]. 岩土工程学报, 1995, 17(5): 80—85.
- [8] 蔡袁强, 徐长节, 丁狄刚. 循环荷载下成层饱水地基的一维固结[J]. 振动工程学报, 1998, 11(2): 184—193.
- [9] Pyrah I C. One-dimensional consolidation of layered soils[J]. Geotechnique, 1996, 46(3): 555—560.
- [10] Zhu G, Yin J H. Consolidation of double soil layers under depth-dependent ramp load[J]. Geotechnique, 1999, 49(3): 415—421.
- [11] Gray H. Simultaneous consolidation of contiguous layers of unlike compressible soils[J]. Transactions, ASCE, 1945, 110: 1327—1356.
- [12] 谢康和. 层状土半透水边界一维固结分析[J]. 浙江大学学报(自然科学版), 1996, 30(5): 567—575.
- [13] 王奎华, 谢康和, 曾国熙. 双面半透水边界的一维粘弹性固结理论[J]. 岩土工程学报, 1998, 20(2): 34—36.
- [14] Durbin F. Numerical inversion of Laplace transform: an efficient improvement to Dubner and Abate's method[J]. The Computer Journal, 1974, 17(4): 371—376.

One-Dimensional Consolidation of Layered Soils With Impeded Boundaries Under Time-Dependent Loadings

CAI Yuan-qiang¹, LIANG Xu^{1,2}, WU Shi-ming¹

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Zhejiang University,

Hangzhou 310027, P. R. China;

(2. Hangzhou Construction Committee, Hangzhou 310027, P. R. China)

Abstract: On the basis of Terzaghi's one-dimensional consolidation theory, the variation of effective stress ratio in layered saturated soils with impeded boundaries under time-dependent loading was studied. By the method of Laplace transform, the solution was presented. Influences of different kinds of cyclic loadings and impeded boundaries conditions were discussed. Through numerical inversion of Laplace transform, useful illustrations were given considering several common time-dependent loadings. Pervious or impervious boundary condition is just the special case of the problem considered here. Compared with average index method, the results from the method illustrated are more accurate.

Key words: one-dimensional consolidation; impeded boundary; layered soil; time-dependent loading; Laplace transform; effective stress ratio; average index method