

考虑 Hansbo 渗流时施工荷载下饱和黏土的一维固结

程天博,刘忠玉,张 杰

(郑州大学 土木工程学院,河南 郑州 450001)

摘 要:引入 Hansbo 渗流方程描述非 Darcy 渗流,考虑施工过程中荷载随时间的变化,修正了 Terzaghi 饱和黏土一维固结方程,建立了以有效应力为求解对象的非线性控制方程,并用有限体积法进行数值计算,讨论 Hansbo 渗流参数和施工速度对饱和黏土层固结特性的影响.计算结果表明:Hansbo 渗流加剧了施工期孔压的累积,延缓了竣工后孔压的消散,地基的固结速度随 Hansbo 渗流参数增大而变慢,而施工速度仅对施工期和竣工初期的地基固结影响显著.

关键词:固结理论;有限体积法;Hansbo 渗流;施工荷载

中图分类号: TU431

文献标志码: A

doi:10.3969/j.issn.1671-6833.2012.01.007

0 引言

传统的 Terzaghi 一维固结理论将地基视为均质的线性变形体,并假定作用其上的荷载不随时间变化,且渗流可用 Darcy 定律描述.但是,施工过程中荷载一般是逐渐增大的,竣工后才可视其为定值.据观测统计,施工期及竣工初期的建筑物很容易出现裂缝,其主要原因在于地基的差异沉降在该阶段发展甚快.因此要合理分析地基的沉降过程,就应该考虑施工期荷载的变化.所以,文献[1-4]将 Terzaghi 一维固结理论推广至变荷载,不过文献[1-3]仍假定其中的渗流符合 Darcy 定律,但越来越多的渗透试验表明 Darcy 定律并不总是成立^[5-6],且 Hansbo 渗流方程(1)^[7]有更大的适用范围

$$\begin{cases} q = ci^m, & (i \leq i_1) \\ q = K(i - i_0), & (i > i_1) \end{cases} \quad (1)$$

式中: q 为渗流速度; m 为由实验确定的常数; c 、 K 分别为低速曲线段和高速线性段的渗透系数; i 为水力梯度; i_1 和 i_0 分别为直线渗流起始水力梯度和直线渗流计算起始水力梯度,且 $i_0 = i_1(m-1)/m$, $c = K/(mi_1^{m-1})$.很明显 Darcy 定律是式(1)的特例.因此,文献[8-10]分别采用式(1)或其

退化形式描述黏土中的非 Darcy 渗流,探讨了有关参数对黏土地基渗透固结的影响,但这些文献都没有考虑施工期荷载的变化.文献[4]考虑了变荷载,但仅讨论了渗流起始水力梯度的影响.笔者拟在文献[10]的基础上,用式(1)描述渗流,同时考虑随时间变化的施工荷载来修正 Terzaghi 一维固结方程,并初步探讨施工速度和 Hansbo 渗流参数对饱和黏土地基固结特性的影响.

1 分析模型

考虑一厚度为 H 的饱和黏土地基,顶面透水,底面不透水且不可压缩(如图1).假定施工荷载 $p(t)$ 无限均布于其表面,其初始值为 p_0 ,最终值为 p_{max} ,加载历时为 t_c (如图2),且式(1)中的渗流参数在固结过程中都保持为常数,其它同 Terzaghi 假定.设时刻 t ,深度 z 处的孔隙水压力和有效应力分别为 $u(z, t)$ 和 $\sigma'(z, t)$,以有效应力为求解对象,可得一维固结方程为

$$\frac{C_v}{\gamma_w^{M-1} i_1^{M-1}} \left(\frac{\partial \sigma'}{\partial z} \right)^{M-1} \frac{\partial^2 \sigma'}{\partial z^2} = \frac{\partial \sigma'}{\partial t}, \quad (2)$$

式中: C_v 为竖向固结系数, $C_v = K(1+e)/(\alpha \gamma_w)$; e 是地基土的孔隙比; α 为地基压缩系数; γ_w 为水的重度.当 $i \leq i_1$ 时,参数 $M = m$;当 $i > i_1$ 时, $M = 1$.相应的初始条件和边界条件分别为

收稿日期:2011-10-08;修订日期:2011-11-13

基金项目:广东省科技计划资助项目(2007B06040102)

作者简介:程天博(1972-),男,湖北黄石人,郑州大学讲师,主要从事施工管理方面的教学与研究工作,E-mail:ctb@jianda.cn;通信作者:刘忠玉(1968-),男,河南延津人,郑州大学教授,博士,主要从事岩土力学方面的教学与研究工作,E-mail:zhylu@zzu.edu.cn.

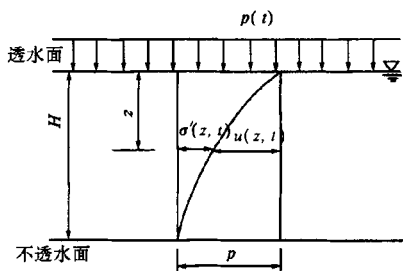


图1 地基固结的计算模型

Fig. 1 Computation model for clay consolidation

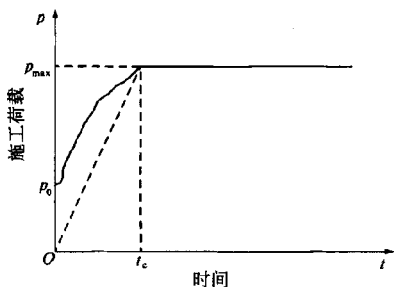


图2 施工荷载

Fig. 2 Time-dependent construction loading

$$\sigma'(z, 0) = 0, \quad 0 \leq z \leq H; \quad (3)$$

$$\sigma'(0, t) = p, \quad \frac{\partial \sigma'}{\partial z}(H, t) = 0, \quad t > 0. \quad (4)$$

为便于讨论,引入无量纲参数

$$U = \frac{u}{p_{\max}}, Z = \frac{z}{H}, T = \frac{C_v t}{H^2}, T_c = \frac{C_v t_c}{H^2}, I = \frac{i \gamma_w H}{p_{\max}}, \quad (5)$$

$$I_1 = \frac{i_1 \gamma_w H}{p_{\max}}, P(T) = \frac{p(t)}{p_{\max}}, S = \frac{\sigma'}{p_{\max}}.$$

式(2)~(4)则变为

$$C \frac{\partial^2 S}{\partial Z^2} = \frac{\partial S}{\partial T}, \quad (6)$$

$$S(Z, 0) = 0, \quad 0 \leq Z \leq 1, \quad (7)$$

$$S(0, T) = P, \quad \frac{\partial S}{\partial Z}(1, T) = 0, \quad T > 0, \quad (8)$$

式中: $C = \frac{1}{I_1^{M-1}} \left(\frac{\partial S}{\partial Z} \right)^{M-1}$; 当 $I \leq I_1$ 时, 参数 $M = m$, 当 $I > I_1$ 时, $M = 1$.

2 有限体积法数值求解格式

笔者采用有限体积法求上述方程的数值解. 即以厚度 ΔZ 将地基自上而下均匀分为 N 层, 将每层视为一控制容积, 并将节点布置在每层的中点; 时间按给定的步长 ΔT 均匀离散. 假定式(6)中 T_{k+1} 时刻的 C 在每一层中不变, 并近似以 T_k 时刻该层中点值代替, 然后从时刻 T_k 到 T_{k+1} , 在第 j

层内对式(6)积分可得

$$C_j \int_{T_k}^{T_{k+1}} \left(\frac{\partial S}{\partial Z} \right)_B - \left(\frac{\partial S}{\partial Z} \right)_A dT = \int_{\Delta Z} \left[\int_{T_k}^{T_{k+1}} \frac{\partial S}{\partial T} dT \right] dZ, \quad (9)$$

式中: 下标 A, B 分别表示该层的上、下边界.

对式(9)等式右边 S 关于 T 的偏导数和等式左边 S 关于 Z 的偏导数分别以一阶向前差分和中点差分近似, 并按全隐格式表示其中时间积分项, 即分别取时刻 T_k 和 T_{k+1} 的权重为 0 和 1, 则

$$C_j S_{j-1, k+1} - (2C_j + \frac{\Delta Z^2}{\Delta T}) S_{j, k+1} + C_j S_{j+1, k+1} = -\frac{\Delta Z^2}{\Delta T} S_{j, k}. \quad (10)$$

离散后的初始条件为

$$S_{j, 0} = 0. \quad (11)$$

对于控制容积 1 和 N , 分别考虑透水边界条件和不透水边界条件, 式(9)可离散形式为

$$-(3C_1 + \frac{\Delta Z^2}{\Delta T}) S_{1, k+1} + C_1 S_{2, k+1} = -\frac{\Delta Z^2}{\Delta T} S_{1, k} - 2P_{k+1}, \quad (12)$$

$$C_N S_{N-1, k+1} - (\frac{\Delta Z^2}{\Delta T} + C_N) S_{N, k+1} = -\frac{\Delta Z^2}{\Delta T} S_{N, k}. \quad (13)$$

3 结果分析

笔者仅讨论图2中虚线所示的线性施工荷载, 即地面荷载 p 从 0 线性增加到 p_{\max} 后不变. 在以下计算中, 取 $N = 50, \Delta T = 10^{-6}$.

3.1 Hansbo 渗流参数的影响

图3分别给出了不同 Hansbo 渗流参数 m 或 I_1 时地基平均孔压 U_a 与时间 T 的关系曲线(为便于对比, 图中以实线画了 Darcy 渗流时的对应曲线, 下同). 基于 Hansbo 渗流的平均孔压均大于基于 Darcy 渗流的结果, 即 Hansbo 渗流导致施工期间($T < T_c$)孔压的累积速度要快于 Darcy 渗流, 但在竣工后 Hansbo 渗流导致孔压的消散速度则要慢于 Darcy 渗流, 并且 m 或 I_1 值越大, 这种趋势越明显.

为考察 Hansbo 渗流参数对平均固结度 U_t 的影响, 图4分别绘出了不同 m 或 I_1 值时 U_t 随时间 T 的变化规律. 该图表明, 比起 Darcy 渗流, Hansbo 渗流延缓了地基的固结速度, 并且随 m 或 I_1 值的增大而变得更慢. 例如, 若固结度 U_t 要达到 80%, 对于 Darcy 渗流, $T = 0.842$; 对于 Hansbo 渗流, 当 $m = 2.0$ 和 $I_1 = 0.5, 1.0, 2.0$ 或 5.0 时, $T = 1.186, 1.836, 3.293$ 或 7.698 . 因此, 如不考虑渗流

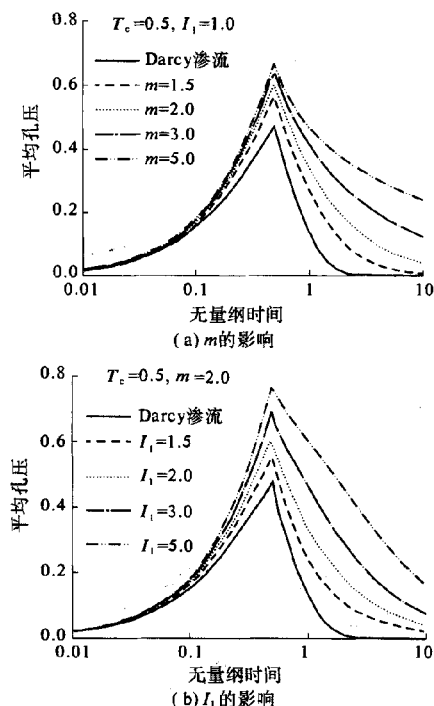


图3 Hansbo 渗流参数对平均孔压的影响

Fig. 3 Effects of the parameters of Hansbo flow on average pore water pressure

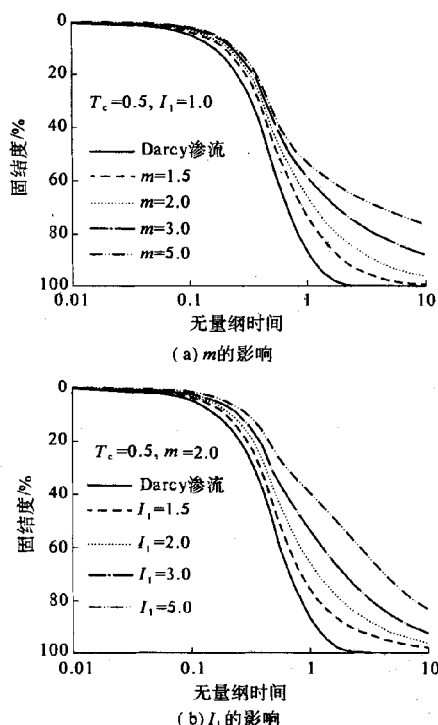


图4 Hansbo 渗流参数对固结度的影响

Fig. 4 Effects of parameters of Hansbo flow on degree of consolidation

的非 Darcy 特性, 会将地基的实际固结速度估计过高. 结合参数 I_1 的定义式(5)可以看出, 黏土层越厚或最大地面压力值越小, 基于 Hansbo 渗流和基于 Darcy 算得的固结度和平均孔压值之间的差别就越大. 因此, 参数 I_1 和固结系数 C_v 一样, 都是表征地基固结进程的重要参数.

3.2 施工速度的影响

文献[4]在引入仅考虑渗流起始水力梯度的非 Darcy 渗流方程修正 Terzaghi 固结理论时曾分析了施工速度的影响, 并得到如下结论: 施工速度越慢(即施工期 T_c 越长), 施工期孔压累积就越慢, 固结度也越小, 因此这期间如忽略施工速度, 则会将地基固结度估计过大; 而在竣工后, 前期施工速度的影响则随时间而变小, 并且对最终沉降量的影响完全可以忽略. 这里采用 Hansbo 方程(1)描述渗流时, 也可得到类似结论, 如图 5 所示. 但是从文献[4]可以看出, 由于仅考虑渗流起始水力梯度使得地基中存在一定的残余孔压不能完全消散, 因此地基的最终固结度不可能达到 100%. 但采用 Hansbo 方程描述渗流时, 由于考虑了较小水力梯度时曲线段的影响, 因而地基中的孔压最终可以完全消散, 相应地, 最终固结度也可以达到 100%, 如图 5 所示. 显然后者更符合实际.

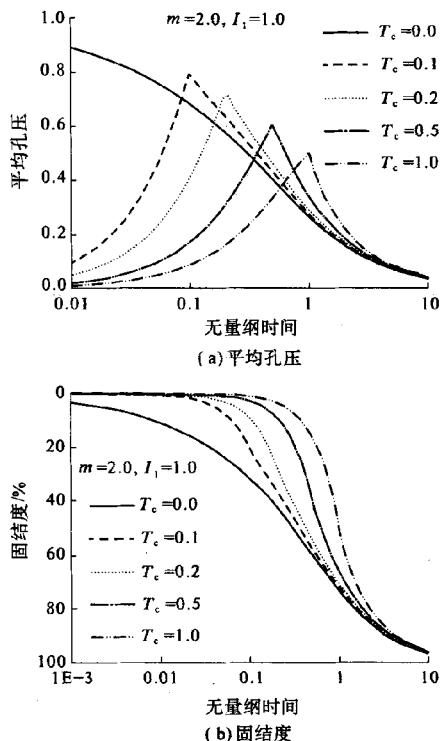


图5 施工速度的影响

Fig. 5 Effects of loading rate on process of consolidation

4 结论

引入描述非 Darcy 渗流的 Hansbo 方程,考虑施工荷载随时间的变化,对 Terzaghi 一维固结方程进行了修正,并给出了有限体积法数值求解格式。

(1) 比起 Darcy 渗流, Hansbo 渗流加剧了施工期孔压的累积,延缓了竣工后地基中孔压的消散,因而也延缓了地基的固结速度,且 Hansbo 渗流参数 m 和 I_1 越大,这种趋势越明显。所以参数 I_1 和固结系数 C_v 一样,都应视为描述地基固结特性的重要参数。

(2) 施工速度对施工期和竣工初期地基固结的影响不可忽略,但随时间增长,其影响越来越小。

参考文献:

- [1] OLSON R E. Consolidation under time-dependent loading[J]. Journal of Geotechnical Engineering Division ASCE, 1977, 103(1): 55 - 60.
- [2] 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.
- [3] 殷宗泽. 土工原理[M]. 北京:中国水利水电出版社,2007.
- [4] 刘忠玉,范如琴,马崇武. 考虑起始水力梯度时变荷载饱和黏土一维固结[J]. 郑州大学学报:工学版,2009,30(3): 35 - 38.
- [5] 齐添,谢康和,胡安峰,等. 萧山黏土非达西渗流性状的试验研究[J]. 浙江大学学报:自然科学版,2007,41(6): 1023 - 1028.
- [6] 孙丽云,乐金朝,张杰. 饱和黏土非达西渗透特性试验研究[J]. 郑州大学学报:工学版,2010,31(6): 31 - 34.
- [7] HANSBO S. Consolidation of clay with special reference to influence of vertical sand drains [J]. Swedish Geotechnical Institute, 1960, 18(1): 45 - 50.
- [8] 谢海澜,武强,赵增敏,等. 考虑非达西流的弱透水层固结计算[J]. 岩土力学,2007,28(5): 1061 - 1065.
- [9] 刘忠玉,张天航,马崇武. 起始水力梯度对饱和黏土一维固结的影响[J]. 岩土力学,2007,29(3): 467 - 470.
- [10] 刘忠玉,孙丽云,乐金朝,等. 基于非 Darcy 渗流的饱和黏土一维固结理论[J]. 岩石力学与工程学报,2009,28(5): 973 - 979.

One-dimensional Consolidation of Saturated Clays under Construction Loadings Considering Hansbo flow

CHENG Tian-bo, LIU Zhong-yu, ZHANG Jie

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

Abstract: The Hansbo's formula for non-Darcy flow is introduced to modify Terzaghi's 1-D consolidation equation, and the modified equation is generalized to account for the consolidation case under time-dependent construction loadings. The dependent variable of the presented nonlinear consolidation equation is the effective stress, and numerical analysis is performed by using the finite volume method. Then the effects of the parameters of Hansbo flow and the rate of loading on the 1-D consolidation behaviors of saturated clay layers are investigated. The numerical results indicate that Hansbo flow causes the more accumulation of the pore water pressure in the construction period and delays its dissipation after construction, and the rate of settlement of the soil layer decreases with the increase of the parameters of Hansbo flow. In addition, the influence of loading rate on the consolidation behaviors is remarkable in the construction period and at the initial stage after its completion of construction.

Key Words: consolidation theory; finite volume method; Hansbo flow; construction loading