

考虑地下水浸没作用的固结沉降计算方法

李 婉^{1,2}, 陈正汉¹, 董志良³

(1.后勤工程学院 土木工程系, 重庆 400041; 2.空军工程大学 机场工程系, 西安 710000; 3.广州四航工程技术研究院, 广州 510230)

摘 要: 研究了地下水浸没对附加应力减小的作用, 同时分析了附加应力变化对最终沉降量的影响, 给出了考虑地下水浸没作用的大、小应变条件下的固结沉降计算公式, 并对几种工况下的计算结果进行了对比分析。结果表明, 考虑地下水浸没作用对地基固结沉降的影响随荷载和土压缩性以及土层厚度的增加而增大, 采用大变形固结理论计算固结沉降较符合实际情况。

关 键 词: 堆载预压; 地下水浸没作用; 固结沉降; 大变形固结理论

中图分类号: TU 433; TU 411.5

文献标识码: A

Computational method for consolidation settlement considering submergence due to groundwater during preloading

LI Wan^{1,2}, CHEN Zheng-han¹, DONG Zhi-liang³

(1. Department of Civil Engineering, Institute of Logistic Engineering, Chongqing 400041, China;

2. Department of Air Port Engineering, Xian 710000, China;

3. Guangzhou Sihang Engineering Technology Research Institute, Guangzhou 510230, China)

Abstract: The reducing of additional stress due to groundwater submergence is studied; and the influence of the variation of additional stress on final settlement is analyzed. The consolidation settlement formulas taking into consideration submergence of small-strain and large-strain are derived. The results from several numerical examples are analyzed and compared. It is shown that the influence of submerge on consolidation settlement of ground increases with load, soil compressibility and thickness of soil, The calculating value of consolidation settlement using large-strain consolidation theory is rather accord with actual examples.

Key words: preloading method; submergence; consolidation settlement; large-strain consolidation theory

1 引 言

在传统的地基最终沉降和固结沉降的计算过程中, 通常假定附加应力值为常数, 不随固结沉降而变化。但是在沿海地区采用堆载预压法加固变形较大的软土地基时, 在荷载的作用下地基发生固结沉降, 原来地下水位以上的部分堆载会被浸没, 使得荷载值逐渐减小。对于以沉降或稳定为控制条件进行预压处理的工程, 都需要事先准确地计算固结沉降量, 以保证地基的加固效果。因此, 在这种情况下若还采用上述假定用一维小应变固结理论计算固结沉降量就显得不合理, 有必要进行考虑地下水浸没作用的一维大应变固结理论沉降计算。Baligh 曾提出了能考虑沉降影响的以总水头 h 为变量的一维

线性积分微分方程, 并给出了固结沉降的计算方法^[1], 该方程是在一维小应变固结理论的基础上建立的, 未考虑大变形的影响。

本文在 Gibson^[2, 3]、谢康和^[4, 5]、谢新宇^[6, 7]等人研究软土大变形固结成果的基础上, 分析了地下水浸没作用对附加应力减小的影响; 分别推导了考虑地下水浸没作用的大、小应变条件下的固结沉降计算公式; 同时结合实际工程实例进行计算分析, 给出了相应的简便沉降计算方法。

与谢康和等人研究的问题不同, 本文主要研究荷载随时间非线性减小的情况, 而谢康和等人研究的则是荷载随时间线性增加的情况, 没有考虑地下水浸没作用的影响。

2 考虑沉降影响的附加应力

2.1 问题的描述

如图 1 所示, 厚度为 H 的饱和软黏土土层, 顶面透水, 而其底面不透水, 水位在黏土层顶面以上 H_w 处, 地表作用大面积的均布荷载 q (堆载高度为 h)。对大变形问题, 采用拉格朗日坐标, 以 a 为坐标变量, 以竖直向下为正。固结前荷载 q 的初值记为 q_0 :

$$q_0 = \gamma(h - H_w) + \gamma' H_w \quad (1)$$

固结期间荷载 q 的值记为 $q(t)$:

$$q(t) = q_0 - (\gamma - \gamma')S(t) \quad (2)$$

式中: γ 和 γ' 分别为填土的湿重度和有效重度; $S(t)$ 为固结期间地表在 t 时刻的沉降量。

式 (2) 体现了考虑地下水的浸没作用使荷载减少, 说明了荷载 q 是时间 t 的函数, 即 $q = q(t)$ 。由于式 (2) 中的沉降 $S(t)$ 无法预先知道, 是问题解答的一部分, 因此, 本文所讨论的问题是一个动边界问题。

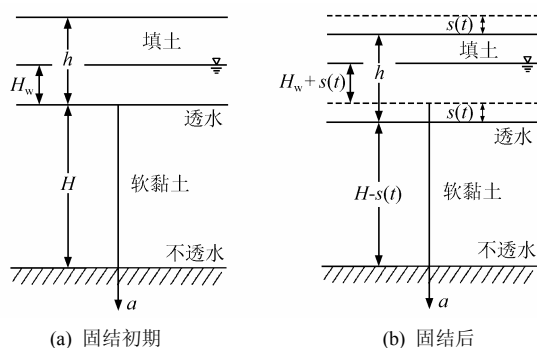


图 1 固结过程地基荷载变化示意图

Fig.1 Sketch map for the change in ground load during process of consolidation

2.2 考虑沉降影响的一维小应变固结问题及解答

类似于 Terzaghi 固结理论方程的推导, 可导出考虑浸没作用影响的一维小应变固结微分方程为

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \left(\frac{k}{\gamma_w} \frac{1+e}{a_v} \right) \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + \frac{\partial q}{\partial t} = c_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + f(t) \quad (3)$$

式中: $c_v = \frac{k(1+e)}{\gamma_w a}$ 为土的竖向固结系数; $f(t) = \frac{dq}{dt}$ 。

在单面排水条件下 (即顶面透水, 底面不透水)

固结控制方程 (3) 的求解条件为

$$\left. \begin{array}{l} \text{边界条件:} \\ u(0, t) = 0 \\ \frac{\partial u}{\partial z}(H, t) = 0 \\ \text{初始条件:} \\ u(z, 0) = q_0 \end{array} \right\} \quad (4)$$

采用分离变量法求解, 可得:

$$u(z, t) = \sum_{m=1}^{\infty} \frac{2}{M} \sin\left(\frac{M}{H}z\right) \exp\left[-\frac{M^2 c_v}{H^2}t\right] \cdot \left\{ \int_0^t f(\tau) \exp\left[\frac{M^2 c_v}{H^2}\tau\right] d\tau + q_0 \right\} \quad (5)$$

根据有效应力公式, 可得地表任意时刻的固结沉降为

$$S = S(z, t) = \int_0^H \frac{\sigma'}{E_s} dz = \frac{1}{E_s} \int_0^H (q - u) dz = \frac{q(t)}{E_s} H - \frac{1}{E_s} \int_0^H u(z, t) dz \quad (6)$$

式中 E_s 为土体的压缩模量。因此, 只要知道 $f(t)$ 的变化规律, 就可以从式 (5), 式 (6) 求出孔压和固结沉降。

2.3 考虑沉降影响的一维大应变固结问题及解答

根据谢康和等人的研究, 假设土体在固结中压缩性和渗透性的非线性变化遵循以下两式^[4, 5]:

$$-\frac{1}{1+e} \frac{de}{d\sigma'} = m_{vl} = \text{constant} \quad (7)$$

$$k_v = k_{v0} \frac{(1+e)^2}{(1+e_0)^2} \quad (8)$$

式中 e 为孔隙比。由此可得变荷载一维大应变非线性固结方程在拉格朗日坐标中的表达式为

$$c_{v0} \left[\frac{\partial^2 u}{\partial a^2} + m_{vl} \left(\frac{\partial u}{\partial a} \right)^2 \right] = \frac{\partial u}{\partial t} - \frac{dq}{dt} \quad (9)$$

式中: $c_{v0} = \frac{k_{v0}}{m_{vl} \gamma_w}$ 为土体初始固结系数; m_{vl} 为大变形中土体的体积变形模量; k_{v0} 为土体的初始渗透系数。

在单面排水条件下 (即顶面透水, 底面不透水) 固结控制方程 (9) 的求解条件为

边界条件:

$$\left. \begin{aligned} u(0, t) &= 0 \\ \frac{\partial u}{\partial a}(H, t) &= 0 \\ \text{初始条件:} \\ u(a, 0) &= q_0 \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

为求解满足条件 (10) 的方程 (9), 作变换如下^[5]:

$$\omega = \omega(a, t) = \exp(m_{vi}u) - 1 \quad (11)$$

控制方程式 (9) 及相应的求解条件式 (10) 即变化为

$$c_{v0} \frac{\partial^2 \omega}{\partial a^2} - \frac{\partial \omega}{\partial t} + (1 + \omega)f(t) = 0 \quad (12)$$

$$\left. \begin{aligned} \omega(0, t) &= 0 \\ \frac{\partial \omega}{\partial a}(H, t) &= 0 \\ \omega(a, 0) &= \exp(m_{vi}q_0) - 1 \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

式中 $f(t) = m_{vi} \frac{dq}{dt}$ 。

采用分离变量法求解, 可得:

$$\omega(a, t) = \sum_{m=1}^{\infty} \frac{2}{M} \sin\left(\frac{M}{H}a\right) \exp\left[-\int_0^t g_m(\tau) d\tau\right] \cdot \left\{ \int_0^t f(\tau) \exp\left[\int_0^{\tau} g_m(a) da\right] d\tau + \exp(m_{vi}q_0) - 1 \right\} \quad (14)$$

因为式 (11) 可变形为

$$u = \frac{1}{m_{vi}} \ln(1 + \omega) \quad (15)$$

固结沉降 S 为

$$S = \int_a^H \{1 - \exp[-m_{vi}q(t)] \exp(m_{vi}u)\} da \quad (16)$$

将式 (15) 代入式 (16), 可得

$$S = (H - a) \{1 - \exp[-m_{vi}q(t)]\} - \exp[-m_{vi}q(t)] \int_a^H \omega da \quad (17)$$

再将式 (14) 代入式 (17), 并积分, 可得:

$$S(a, t) = (H - a) \{1 - \exp[-m_{vi}q(t)]\} - H \exp[-m_{vi}q(t)] \sum_{m=1}^{\infty} \frac{2}{M^2} \cos\left(\frac{Ma}{H}\right) \exp\left[-\int_0^t g_m(\tau) d\tau\right] \cdot \left\{ \int_0^t f(\tau) \exp\left[\int_0^{\tau} g_m(a) da\right] d\tau + \exp(m_{vi}q_0) - 1 \right\} \quad (18)$$

根据式 (18) 可进一步得到土层顶面沉降为

$$S(0, t) = H \{1 - \exp[-m_{vi}q(t)]\} - H \exp[-m_{vi}q(t)] \sum_{m=1}^{\infty} \frac{2}{M^2} \exp\left[-\int_0^t g_m(\tau) d\tau\right] \cdot \left\{ \int_0^t f(\tau) \exp\left[\int_0^{\tau} g_m(a) da\right] d\tau + \exp(m_{vi}q_0) - 1 \right\} \quad (19)$$

故只要知道了 $f(t)$, 就可由式 (19) 得出大变形条件下的地基固结沉降。

2.4 荷载的变化规律及地基最终沉降量

由地基固结度的表达式可知, 沉降按指数函数规律变化, 故可假设荷载随时间的变化规律为

$$q = q(t) = A + B e^{-Ct} \quad (20)$$

式中 A , B , C 待定系数, 其确定方法见文献[10]。则一维小变形固结理论条件下, 由式 (6) 可得地表最终沉降为

$$S = S(0, \infty) = \frac{H}{E_s} A \quad (21)$$

若不考虑地下水浸没作用 (即常规方法), 则 $A = q_0$, 因此有

$$S = S(0, \infty) = \frac{H}{E_s} q_0 \quad (22)$$

在一维大变形固结理论条件下, 地表最终沉降由式 (19) 得出:

$$S(0, t) = H [1 - \exp(-Am_{vi})] \quad (23)$$

3 实例分析

深圳蛇口集装箱码头二期地基处理工程是对围海造陆形成的复杂地基进行加固处理, 根据地质情况将整个处理区分为 8 个试验区, 其中对以淤泥为主的区域采用堆载预压排水固结法进行地基处理, 其面积为 18 989 m²。首先进行开挖, 然后回填 1 m 砂垫层, 再打设塑料排水板。排水板布置呈正三角形, 间距 1.0 m, 平均打设深度为 20 m。以开山石为堆载填料, 其湿重度 $\gamma = 18$ kN/m², 有效重度 $\gamma' = 11$ kN/m²。本文以其中的 B1-1, B1-2, C, F, G1, G2 6 个区域为例进行计算分析, 各区的土性参数见表 1。

根据对本区荷载变化规律的研究, 发现上述公式中待定系数 A 的取值跟荷载值、软土压缩系数和软土层厚度有关 (见表 2), 经分析可得 A 的计算公式为

$$A = 9.216 \ 343 + 0.958 \ 876 \frac{q_0}{Pa} - 8.178 \ 79 m_v Pa - 0.862 \ 34 h \quad (24)$$

式中: Pa 为一个大气压 (101.3 kPa), h 为以 m 为单位的软土层厚度, 只取数值。 C 值变化不大, 一般在 0.012~0.016 范围内。由表 2 可见, 该工地不同分区的 A/q_0 的平均值为 93 %。

本文采用 4 种工况进行计算来分析地下水浸没作用对沉降的影响:

(1) 工况 1: 不考虑地下水浸没作用, 按小变形固结理论的公式 (22) 计算;

(2) 工况 2: 考虑地下水浸没作用, 按小变形固结理论的公式 (21) 计算;

(3) 工况 3: 考虑地下水浸没作用, 按大变形固结理论的公式 (23) 计算;

(4) 工况 4: 计算荷载取原荷载的 93 %按小变形固结理论的公式 (22) 计算。

B1-1, B1-2, C, F, G1, G2 6 区起始预压荷载分别为 135.0, 135.0, 149.4, 153.5, 156.6, 142.2 kPa, 淤泥层厚度分别为 6.0, 5.7, 15.15, 15.25, 12.4, 10.05 m。

固结度为 90 %时的计算结果如表 3 所示。由表 3 可见, 考虑地下水浸没作用的大、小变形固结理论计算的地基固结沉降量小于常规方法的计算结果, 且按大变形固结理论计算的结果要小于按小变形固结理论计算的结果。常规方法计算值与实测值的相对误差为 8.73 %~21.71 %; 小变形固结理论方法计算值与实测值的相对误差为 3.58 %~13.22 %; 而大变形固结理论方法计算值与实测值的相对误差为 0.13 %~9.14 %, 与实测值比较接近, 说明大变形理论较小变形理论更适合高压缩性土地基的计算, 此结论与 Cater^[8], Prevost^[9]及谢新宇^[7]的结论一致。

比较表中工况 3 和工况 4 的计算结果还可以看出, 按本文方法取原荷载的 93 %用传统方法计算所得沉降量与实测值及按式 (23) 计算所得的沉降量都较接近。因此, 为简化计算, 加固的软土层在 10 m 以上范围时, 可取初始荷载的 93 %用传统方法计算沉降量。

表 1 各区的加固厚度及土性参数

Table 1 Thicknesses and parameters of soils in several areas

区号	H / m	w / %	ρ / $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	e	a_v / MPa^{-1}	m_v / MPa^{-1}	k / $\times 10^{-7} \text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$	w_l / %	w_p / %	I_l
F 区	15.25	77.10	1.536	2.030	2.460	0.812	0.480	60.80	31.60	1.570
C 区	15.15	65.00	1.613	1.810	1.932	0.688	0.281	57.00	31.90	1.310
G1 区	12.40	67.10	1.596	1.870	1.890	0.659	0.370	58.00	29.60	1.350
G2 区	10.05	62.74	1.604	1.781	1.637	0.589	0.390	57.54	31.70	1.206
B1-1 区	6.00	64.10	1.640	1.742	1.393	0.508	0.350	58.00	31.20	1.230
B1-2 区	5.70	66.73	1.583	1.890	1.590	0.550	0.410	61.78	32.30	1.180

表 2 各区的荷载、体积压缩系数、土层厚度及待定系数 A

Table 2 Load, coefficient of volume compressibility, thickness and undetermined coefficient A of different areas

区号	q_0 / kPa	H / m	m_v / MPa^{-1}	A	A/q_0
F 区	153.486	15.25	0.812	135.887	0.885
C 区	156.600	15.15	0.659	144.406	0.922
G1 区	142.200	12.40	0.589	131.212	0.923
G2 区	149.400	10.05	0.688	141.041	0.944
B1-1 区	135.000	6.00	0.508	129.368	0.958
B1-2 区	135.000	5.70	0.550	128.053	0.949
相关系数	0.905	0.684	0.555		

表 3 各种工况计算结果比较

Table 3 Comparisons of results from several numerical examples

区号	实测	工况 1		工况 2		工况 3		工况 4	
	S_0 / m	S_1 / m	ΔS_1 / %	S_2 / m	ΔS_2 / %	S_3 / m	ΔS_3 / %	S_4 / m	ΔS_4 / %
F 区	1.515	1.840	17.643	1.626	6.80	1.539	1.57	1.540	1.60
C 区	1.014	1.295	21.706	1.169	13.22	1.116	9.14	1.084	6.46
G1 区	1.396	1.653	15.560	1.464	4.64	1.399	0.21	1.384	0.88
G2 区	0.885	1.010	12.384	0.918	3.58	0.884	0.13	0.845	4.68
B1-1 区	0.338	0.370	8.731	0.355	4.75	0.343	1.58	0.310	9.04
B1-2 区	0.347	0.381	8.901	0.365	4.86	0.352	1.44	0.319	8.84

注: 表中实测及计算的固结沉降量均是固结度为 90 %时的值。

4 结 论

与传统观念不同,考虑地下水浸没作用后,地基附加应力值是时间的函数,不再是恒值。基于这一认识,本文通过理论分析和数值计算,对该问题进行了深入研究,取得的主要成果如下:

(1) 建立了考虑地下水浸没作用的软土一维小变形和大变形固结模型,并得出相应的理论解答。

(2) 通过实测资料的统计分析,给出了模型参数的变化规律,特别得出了最终荷载 A 值是初始荷载的93%,据此可作简化计算。

(3) 考虑地下水浸没作用的大、小变形固结理论计算的地基固结沉降量小于常规方法的计算结果,且按大变形固结理论计算的结果要小于按小变形固结理论计算的结果,与实测值比较接近,说明本文建议的模型和方法更适合高压缩性土地基的计算。

本文的研究对于预测深厚软土地基在堆载作用下的变形和固结发展规律具有一定的理论和实际意义。

参 考 文 献

- [1] Baligh M M, Fuleihan A F. Consolidation theory with stress reduction due to settlement[J]. **Journal of Geotechnical Engineering**, ASCE, 1978, 104(GT5): 519—534.
- [2] Gibson R E, England G L, Hussey M J L. The theory of one-dimensional consolidation of saturated clays: I, Finite non-linear consolidation of thin homogeneous layers[J]. **Geotechnique**, 1967, 17(2): 261—273.
- [3] Gibson R E, Schiffman R L, Cargill K W. The theory of one-dimensional consolidation of saturated clays: II, Finite non-linear consolidation of thick homogeneous layers[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 1981, 18(2): 280—293.
- [4] Prevost J H. Nonlinear transient phenomena in saturated porous media[J]. **Computer Methods in Applied Mechanics & Engineering**, 1982, (20): 3—18.
- [5] 谢康和, 郑辉, Leo C J. 软黏土一维非线性大应变固结解析理论[J]. **岩土工程学报**, 2002, 24(6): 680—684.
XIE Kang-he, ZHENG Hui, Leo C J. An analytical theory for 1-D nonlinear large strain consolidation of soft clay[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2002, 24(6): 680—684.
- [6] 谢康和, 郑辉, Leo C J. 变荷载下饱和软黏土一维大应变固结解析理论[J]. **水利学报**, 2003, (10): 6—13.
XIE Kang-he, ZHENG Hui, Leo C J. Analytical solution for 1-D large strain consolidation of saturated soft clay under time-depending loading[J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 2003, (10): 6—13.
- [7] 谢新宇, 朱向荣, 谢康和, 等. 饱和土体一维大变形固结理论新进展[J]. **岩土工程学报**, 1997, 19(4): 30—38.
XIE Xin-yu, ZHU Xiang-rong, Xie Kang-he, et al. New developments of one dimensional large strain consolidation theories[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1997, 19(4): 30—38.
- [8] 谢新宇. 考虑变形耦合的一维大变形固结分析[J]. **浙江大学学报(工学版)**, 2002, 36(5): 544—548.
XIE Xin-yu. Analysis of one dimensional large strain consolidation due to settlement[J]. **Journal of Zhejiang University (Engineering Science)**, 2002, 36(5): 544—548.
- [9] Cater J P, Small J C, Booker J R. A theory of finite elastic consolidation[J]. **International Journal of Solids and Structures**, 1977, 13: 467—478.
- [10] Prevost J H. Nonlinear transient phenomena in saturated porous media[J]. **Computer Methods in Applied Mechanics & Engineering**, 1982, 20: 3—18.
- [11] 李婉, 陈正汉, 董志良. 考虑地下水浸没作用的预压荷载变化规律与沉降计算的研究[A]. 中国土木工程学会第十届土力学及岩土工程学术会议文集[C]. 重庆: [s. n.], 2007.