

地面沉降过程中固结系数的试验研究

徐海洋^{1,2}, 周志芳¹, 高宗旗³

(1. 河海大学地球科学与工程学院, 江苏 南京 210098; 2. 华北水利水电学院资源与环境学院, 河南 郑州 450011;
3. 中交第一航务工程勘察设计院有限公司, 天津 300222)

摘要:根据渗透系数和孔隙比、孔隙比和有效应力的关系推导出固结系数与有效应力的关系公式。利用自行研制的试验装置, 模拟释水条件下地面的沉降过程, 通过对试验数据的分析, 得出固结系数随着土体的压缩而逐渐变小的结论。考虑固结系数的非线性, 修正了 Terzaghi 理论, 将解析解与实测值进行对比, 结果表明考虑了固结系数的非线性能更准确的计算地面的固结沉降。

关键词:太沙基理论; 固结系数; 渗透系数

中图分类号: TU411 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2011)12-1969-05

作者简介:徐海洋(1981-),男,河南信阳人,博士研究生,主要从事地面沉降试验方面的研究。E-mail: xhy0720@163.com。

Experimental study on coefficient of consolidation of land subsidence

XU Hai-yang^{1,2}, ZHOU Zhi-fang¹, GAO Zong-qi³

(1. College of Earth Sciences and Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. School of Resource and Environment, North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power, Zhengzhou 450011, China; 3. CCCC First Harbor Consultants Co., Ltd., Tianjin 300222, China)

Abstract: Based on the relationship among the void ratio, hydraulic conductivity and effective stress, a formula for the coefficient of consolidation and effective stress is derived. Using a self-developed test equipment to simulate land subsidence and through the analysis of test data, it is evident that the coefficient of consolidation is not constant but becomes small under compression. Considering the non-linear coefficient of consolidation, the Terzaghi's theory is modified. Analytic solutions are compared with the measured values. The results show that the calculated values of ground consolidation settlement are more accurate by means of the modified Terzaghi's theory of non-linear coefficient of consolidation.

Key words: Terzaghi's theory; coefficient of consolidation; hydraulic conductivity

0 引言

太沙基理论假定整个固结过程中土的参数均视为常数, 其中固结系数 C_v 是一个估计变形速率的重要参数。在地面沉降过程中, 随着土层释水, 土骨架压密, 土体产生压缩变形, 土体的透水性降低, 即渗透系数 K 变小; 同时可压缩性降低, 即体积压缩系数 m_v 也减小, 而计算出来的 C_v ($C_v = K/\gamma_w m_v$) 一直被当作常数。Davis 等^[1]在研究正常固结黏土的非线性固结时, 用基于固结试验得出的 $e - \lg \sigma'$ 经验关系, 也曾一度通过假定固结过程中渗透系数 K 与体积压缩系数 m_v 的变化是同步的, 即固结系数 C_v 为定值, 得到了一维非线性固结方程, 并获得了解析解。

很多专家对固结系数 C_v 为定值的假定持否定的态度^[2-6]。Duncan^[7]和 Olson^[8]分别在第 27 届和第 31 届 Terzaghi 讲座中明确指出将固结系数 C_v 看作常数是

传统 Terzaghi 固结理论的不足之一。而且很多学者和工程人员在研究和工程实践中也发现固结系数 C_v 并非常量。Lowe John III 等^[9]在研究中得出固结系数 C_v 是变值的结论。马驯^[10]通过统计分析上千组工程上固结系数 C_v 的原位测试数据, 指出当固结压力大于前期固结压力时, 固结系数随固结压力增大而增大; 当固结压力小于前期固结压力时, 固结系数随固结压力增大而减小。林鹏等^[11]、余闯等^[12]均认为对正常固结土, 固结系数随固结应力先增大后减小; 对超固结土, 固结系数随固结应力的增大而增大。

本文在 Terzaghi 固结理论的基础上, 利用渗透系数和孔隙比的关系、孔隙比和有效应力的关系推导出

基金项目: 国家自然科学基金项目(51079043); 水利部公益性行业科研专项经费项目(200901064)

收稿日期: 2010-09-10

地面沉降过程中固结系数和有效应力的关系式，并通过室内试验验证结果的正确性与可行性。

1 固结系数与有效应力的关系

由Terzaghi一维固结理论^[13]，在饱和黏土层顶面下 z 深度处取一微单元体。根据固结渗流的连续条件，微单元体在任一时间 t 的水量变化应等于同一时间 t 该微元体中孔隙体积的变化率，从而可得

$$\frac{K(1+e_0)}{\gamma_w} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \frac{\partial e}{\partial t} \quad (1)$$

式中 e 为 t 时间的孔隙比； u 为孔隙水压力； γ_w 为水的重度； K 为渗透系数； e_0 为初始孔隙比。

由土的压缩曲线 $e - \lg \sigma'$ 关系可得

$$e = e_1 - C_c \lg(\sigma'/\sigma_1') \quad (2)$$

式中， C_c 为土的压缩指数， e_1 为有效应力 σ_1' 时的孔隙比。

将 $\sigma' = \sigma - u$ 代入式 (2) 并对 u 求导，得

$$\frac{\partial e}{\partial u} = \frac{C_c}{\ln 10(\sigma - u)} \quad (3)$$

又有

$$\frac{\partial e}{\partial t} = \frac{\partial e}{\partial u} \frac{\partial u}{\partial t} \quad (4)$$

将式 (3)、(4) 代入 (1) 得

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\ln[10K(1+e_0)]}{\gamma_w C_c} (\sigma - u) \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad (5)$$

对照Terzaghi固结方程 $C_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \frac{\partial u}{\partial t}$ ，可得

$$C_v = \frac{\ln 10 K (1+e_0)}{\gamma_w C_c} \sigma' \quad (6)$$

考虑渗透系数 K 在固结压缩过程中的变化，采用表达式：

$$K = c \frac{e^n}{1+e} \quad (7)$$

式中， e 为孔隙比， c ， n 为参数，由渗流试验确定。式 (7) 由 Taylor^[14] 关于砂土的渗透系数表达式推广至黏性土而得。则固结系数 C_v 与有效应力 σ' 的关系式为

$$C_v = \frac{\ln 10(1+e_0)c[e_1 - C_c \lg(\sigma'/\sigma_1')]}{\gamma_w C_c [1+e_1 - C_c \lg(\sigma'/\sigma_1')]} \sigma' \quad (8)$$

只要确定参数 c 及 n ，就可按不同的有效应力确定固结系数 C_v 。

2 地层沉降试验

为了确定渗透系数与孔隙比的关系，验证表达式的正确性，研制了地面沉降室内试验模型，并对泰州长江公路大桥北锚处的黏土进行了试验。图1为试验装

置的设计图及实体图。

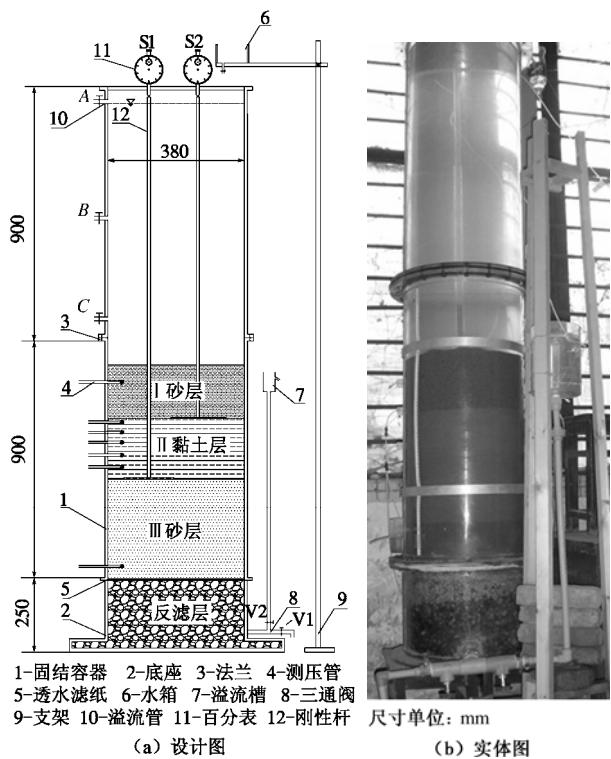


图 1 试验装置设计与实体图

Fig. 1 Experimental devices

试验所用黏土的物理力学参数如表1所示，试验方案如表2所示。

表 1 黏土试样物理力学性质指标

Table 1 Physical and mechanical properties of clay

重度/(kN·m ⁻³)	比重	孔隙比	液限	塑性指数
17.2	2.71	1.3	47	14

表 2 试验方案

试验 编号	I 砂层 /mm	II 黏土层 /mm	III 砂层 /mm	III 砂层水位 变化/m
1		200		
2	200	300	300	1.20
3		400		

试验仪器可以在模拟地面沉降的过程中测得黏土层不同时刻的渗透系数，再根据黏土层的位移计算出孔隙比的变化，最后得出黏土层的渗透系数与孔隙比的关系。I砂层、II黏性土层、III砂层的起始水位都是 H_1 ，打开阀门V2，III砂层中承压水头降低至 H' ，下降了 ΔH ，并保持稳定，黏土的固结过程如图2所示。采用测压管观测黏土层中孔隙水压力的变化，百分表观测黏土层的位移。

以第1组试验为例，每隔一段时间用量筒测量从溢流槽流出水的体积，由此得到不同时间流量和黏土层压缩变形之间的对应关系，如表3所示，水力梯度 $i = \Delta H/H = 120/20 = 6$ 。基于达西定律得出某一时刻黏土

层的渗透系数, 由此得出渗透系数随时间变化的曲线(图3), 孔隙比和渗透系数的变化关系(图4)。

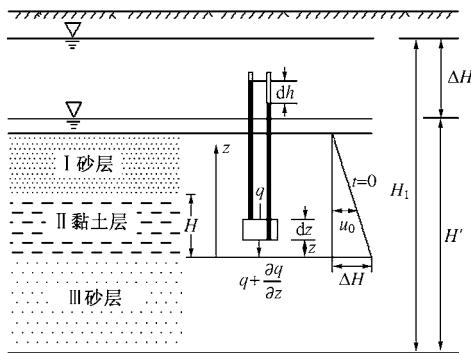


图2 黏土的固结过程

Fig. 2 Process of consolidation of clay

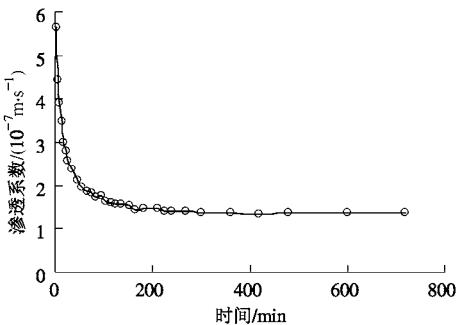


图3 渗透系数随时间的变化曲线

Fig. 3 Variation of hydraulic conductivity with time

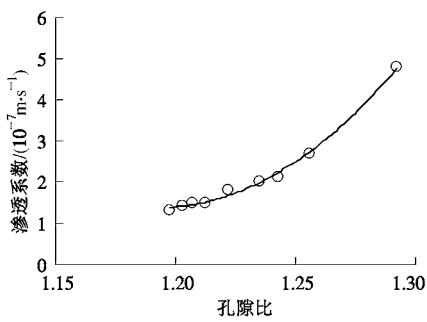


图4 孔隙比和渗透系数的变化关系

Fig. 4 Relationship between void ratio and hydraulic conductivity

3 试验结果分析

从图4可以看出随着孔隙比的变小, 渗透系数也逐渐降低。转化为 $\lg [K(1+e)] - \lg e$ 关系, 基本为一直线(如图5所示): 即 $\lg [K(1+e)] = \lg c + n \lg e$, 可以由此确定式(7)中的 c, n , 得出 $c = 1.95 \times 10^{-8} \text{ m/s}$, $n = 14.9$ 。将第2, 3组试验测得的孔隙比代入关系式求得的渗透系数与实测值基本相同, 如图6所示, 验证了此关系式的正确性。由室内固结试验求得压缩指数 $C_c = 0.85$ 。根据孔隙水压力与时间的关系换算成有效应力与时间的关系, 结合式(8)得出固结系数随时间的变化关系,

如图7所示。从图7中可以看出固结系数从最初的 $5.5 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ 变为 $0.9 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, 随着土体的压缩而逐渐变小。

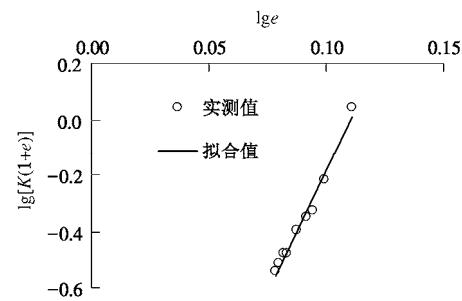


图5 $\lg [K(1+e)] - \lg e$ 关系曲线

Fig. 5 Curve of $\lg [K(1+e)] - \lg e$

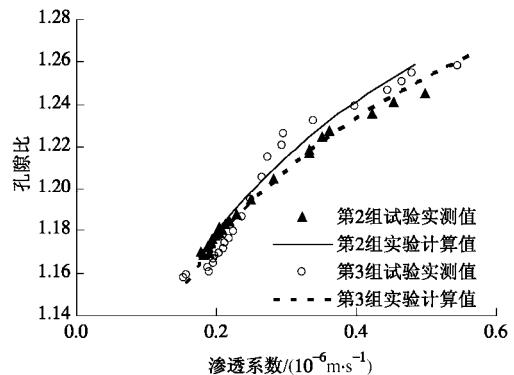


图6 第2, 3组试验渗透系数的计算值与实测值对比曲线

Fig. 6 Comparison between analytic solutions and measured hydraulic conductivities of No.2 and 3 groups of tests

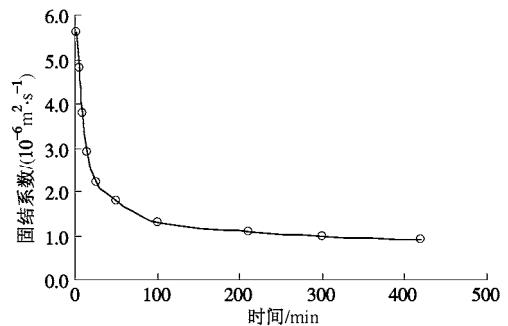


图7 固结系数随时间的变化曲线

Fig. 7 Variation of coefficient of consolidation with time

假设 C_v 随时间而分级变化, 即 $t_{i-1} \leq t \leq t_i$, C_v 是常数。对于第*i*级, 超静孔隙水压力 u_i 由下式给出:

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} = C_{vi} \frac{\partial^2 u_i}{\partial z^2} \quad (9)$$

对于

$$0 \leq z \leq H, u_i(z, 0) = u_{i-1}(z, t_{i-1}) \quad (10)$$

$$0 \leq \bar{t} < \infty, u_i(0, \bar{t}) = 0 \quad (11)$$

$$0 \leq \bar{t} < \infty, u_i(H, \bar{t}) = 0 \quad (12)$$

式中, $\bar{t} = t - t_{i-1}$, H 为黏土层的厚度。

表3 地面沉降试验观测数据

Table 3 Test data of land subsidence

时间 /min	流量 /(mL·s ⁻¹)	黏土层变形 /mm	时间 /min	流量 /(mL·s ⁻¹)	黏土层 变形/mm	时间 /min	流量 /(mL·s ⁻¹)	黏土层 变形/mm
3	0.472	0.31	65	0.157	5.41	181	0.122	7.08
7	0.372	1.27	75	0.152	5.67	210	0.123	7.27
9	0.328	2.03	85	0.143	5.88	225	0.118	7.36
13	0.292	2.41	96	0.148	6.08	240	0.118	7.42
17	0.250	2.83	105	0.137	6.22	270	0.118	7.52
22	0.235	3.43	115	0.133	6.39	300	0.115	7.61
27	0.215	3.62	125	0.132	6.52	361	0.113	7.72
35	0.198	4.06	135	0.130	6.68	420	0.112	7.80
45	0.178	4.50	154	0.128	6.89	480	0.113	7.86
56	0.165	4.98	165	0.120	6.97	600	0.115	7.95

在上述条件下, 用分离变量法可求得式(9)的解为

$$u(z, T_v) = \frac{2\Delta H \gamma_w}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} e^{-\frac{n^2 \pi^2}{4} T_v} \sin \frac{n\pi}{H} z \quad (n=1, 2, 3, \dots), \quad (13)$$

$$U = 1 - \frac{4}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} e^{-\frac{n^2 \pi^2}{4} T_v} \quad (n=1, 3, 5, \dots). \quad (14)$$

式中, $T_v = \frac{1}{H^2} [C_{v1}t_1 + C_{v2}(t_2 - t_1) + \dots + C_{vn}(t_n - t_{n-1})]$ 。假设每级的时间间隔相等, 则

$$T_v = \frac{t}{H^2} [C_{v1} + C_{v2} + C_{v3} + \dots + C_{vn}] \quad (15)$$

式中, $t = t_1 = t_2 - t_1 = t_3 - t_2 = \dots = t_n - t_{n-1}$ 。

取时间间隔为 10 min, 固结系数 C_v 随时间的变化代入到式(13), 可以算出黏土层中的超静孔隙水压力。将固结系数作为定值的 Terzaghi 解析解(图8)和考虑了固结系数非线性的 Terzaghi 解析解(图9)与试验实测值进行对比发现: 考虑了固结系数非线性的 Terzaghi 解析解与实测值拟合得更好。

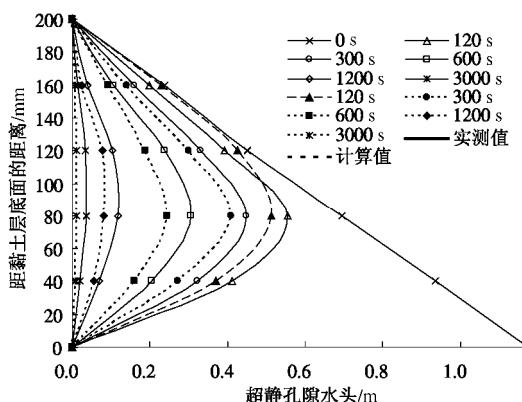


图8 超静孔隙水头 Terzaghi 解析解与试验实测值对比曲线

Fig. 8 Comparison between Terzaghi's analytic solutions and measured excess pore water heads

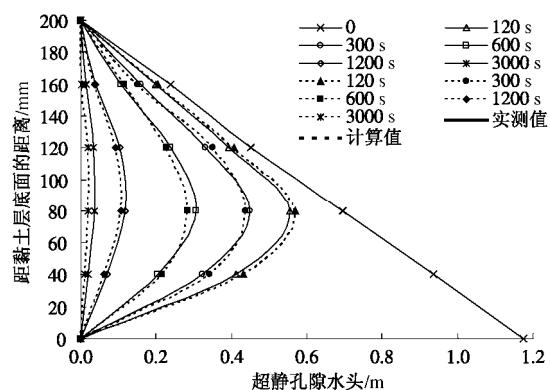


图9 超静孔隙水头修正 Terzaghi 解析解与试验实测值对比曲线

Fig. 9 Comparison between corrected Terzaghi's analytic solutions and measured excess pore water heads

4 结 论

通过对地面沉降过程中固结系数的试验分析得出以下几点结论。

(1) 研制了地面沉降室内试验模型, 得出地面沉降过程中黏土层的渗透系数与孔隙比的关系。

(2) 在地面沉降过程中, 固结系数并不是常数, 而是随着土体的压缩而逐渐变小。

(3) 考虑了固结系数的非线性, 修正了 Terzaghi 理论。将固结系数作为定值的 Terzaghi 解析解和考虑了固结系数非线性的 Terzaghi 解析解与实测值进行对比发现: 考虑了固结系数非线性的 Terzaghi 解析解与实测值拟合得更好。

参考文献:

- [1] DAVIS E H, RAYMOND G P. A non-linear theory of consolidation[J]. Géotechnique, 1965, 15 (2): 161–173.
- [2] ZHU G F, YIN J H. Consolidation of a soil layer subsequent to cessation of deposition[J]. Canadian Geotechnical Journal,

- 2005, **42**(2): 678–682.
- [3] LAMBE P V, WHITMAN R V. Soil mechanics[M]. New York: Wiley, 1979.
- [4] SEAH T H, TANGTHANSUP B, WONGSATIAN P. Horizontal coefficient of consolidation of soft Bangkok clay[J]. Geotechnical Testing Journal, 2004, **27**(5): 430–440.
- [5] SUSHIL S K. Estimating consolidation coefficient and final settlement: triangular excess pore-water pressure[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2005, **131**(8): 1050–1055.
- [6] SUSHIL S K. Identifying consolidation coefficient: linear excess pore-water pressure[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2008, **134**(8): 1205–1209.
- [7] DUNCAN J M. Limitation of conventional analysis of consolidation settlement[J]. Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, 1993, **119**(9): 1333–1359.
- [8] OLSON R E. Settlement of embankments on soft clays[J]. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1998, **124**(4): 278–288.
- [9] LOWE JOHN III, JONAS E, OBRICIAN V. Controlled gradient consolidation test[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundation Engineering Division, ASCE, 1969, **95**(SM1): 77–97.
- [10] 马 驯. 固结系数与固结压力关系的统计分析及研究[J]. 港口工程, 1993(1): 46–53. (MA Xun. Statistical analysis and study of the relations between the coefficient of consolidation and consolidation pressure[J]. Journal of Harbor Engineering, 1993(1): 46–53. (in Chinese))
- [11] 林 鹏, 许镇鸿, 徐 鹏, 等. 软土压缩过程中固结系数的研究[J]. 岩土力学, 2003, **24**(1): 106–112. (LIN Peng, XU Zhen-hong, XU Peng, et al. Research on coefficient of consolidation of soft clay under compression[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, **24**(1): 106–112. (in Chinese))
- [12] 余 闯, 刘松玉. 考虑应力水平的软土固结系数计算与试验研究[J]. 岩土力学, 2004, **25**(增刊 2): 103–107. (YU Chuang, LIU Song-yu. Calculation and experiment on consolidation coefficient for soft clay considering different stress levels[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, **25**(S2): 103–107. (in Chinese))
- [13] TERZAGHI K, PECK R B. Soil mechanics in engineering practice[M]. New York: Wiley, 1967.
- [14] 村山朔郎. 地面沉降的模型试验[C]// 国外地面沉降论文选, 北京: 地质出版社, 1969: 83–101. (MURAYAMA Kitaro. Land subsidence model test[C]// Selected Papers of Foreign Land Subsidence, Beijing: Geological Publishing House, 1969: 83–101. (in Chinese))

本期广告索引

- 封 2 北京金土木软件技术有限公司
- 封 3 重庆市永固工程拉筋带厂有限公司
- 封 4 上海分元土木工程科技有限公司
- 后插 1 广州中海达卫星导航技术股份有限公司
- 后插 2 台州市建元工程勘察仪器有限公司
- 后插 3 北京理正软件设计研究院有限公司