

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2021.110



开放科学(资源服务)标识码(OSID):



考虑渗透系数随时间变化及固结状态影响的一维固结计算

金超奇¹, 徐长节¹, 江平², 颜建伟¹, 程超¹, 章立辰²

(1. 华东交通大学 江西省岩土工程基础设施安全与控制重点实验室; 土木工程国家实验教学示范研究所, 南昌 330013; 2. 江西省港航建设投资集团港航运输有限公司, 南昌 330008)

摘要: 固结系数的不确定性是传统固结理论计算局限性的根本原因, 传统固结理论计算忽略了在固结过程中渗透系数 k 和孔隙比 e 随固结状态和时间的变化。基于工程常用的 5 种渗透系数预测模型, 结合固结度与侧限压缩量的关系, 推导出孔隙比 e_t 的时间函数, 构建渗透系数与时间及固结应力依赖的计算公式。将构建的渗透系数计算式代入固结系数 C_v 中, 同时考虑固结状态、固结应力及时间的影响, 对经典 Terzaghi 一维固结理论进行修正。利用已有的试验数据进行对比, 讨论预测公式的适用性。最后通过工程案例计算, 与 Terzaghi 一维固结方程和其他修正固结理论对比, 结果表明: 当上覆荷载较大时, 需要考虑固结系数 C_v 的变化; 同时, 对比其他修正固结理论, 证明了考虑孔隙比 e 和渗流系数 k 随时间变化过程的必要性。

关键词: 渗透系数; 孔隙比; 固结状态; 固结应力; 时间依赖

中图分类号: TU431 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2022)05-0157-08

One dimensional consolidation calculation considering the change of permeability coefficient with time and the influence of consolidation state

JIN Chaoqi¹, XU Changjie¹, JIANG Ping², YAN Jianwei¹, CHENG Chao¹, ZHANG Lichen²

(1. Jiangxi Key Laboratory of Infrastructure Safety Control in Geotechnical Engineering; National Experimental Teaching Demonstration Center of Civil Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, P. R. China; 2. Jiangxi Provincial Port & Waterway Construction Investment Group Co., Ltd, Nanchang 330008, P. R. China)

Abstract: The uncertainty of the consolidation coefficient is the fundamental reason for the limitation of the traditional consolidation theoretical calculation, which ignores the variation of permeability coefficient k and porosity ratio e with the consolidation state and time during the consolidation. In this paper, the porosity time-history is derived on the basis of five commonly used prediction models of permeability coefficient in engineering, having the relationship between consolidation degree and confined compression. Thus, the

收稿日期: 2021-04-10

基金项目: 国家杰出青年科学基金(51725802); 国家自然科学基金-高铁联合基金(U1934208); 江西省自然科学基金(20192ACB20001); 江西省交通运输厅重点工程科技项目(2019C0010, 2019C0011)

作者简介: 金超奇(1996-), 男, 主要从事岩土工程研究, E-mail: 1466744371@qq.com。

徐长节(通信作者), 男, 教授, 博士生导师, E-mail: xucj@zju.edu.cn。

Received: 2021-04-10

Foundation items: National Science Fund for Distinguished Young Scholars (No. 51725802); High Speed Railway Joint Fund of NSFC (No. U1934208); Jiangxi Natural Science Foundation (No. 20192ACB20001); Key Projects of Jiangxi Provincial Department of Transportation (No. 2019C0010, 2019C0011)

Author brief: JIN Chaoqi (1996-), main research interest: geotechnical engineering, E-mail: 1466744371@qq.com.

XU Changjie (corresponding author), professor, doctoral supervisor, E-mail: xucj@zju.edu.cn.

calculation formula of permeability coefficient related to both time and consolidation stress is constructed. Here the one-dimensional consolidation theory is modified by substituting the permeability coefficient formula into the consolidation coefficient C_v and considering the consolidation state as well as consolidation stress and time variation. The comparisons with the literatures and engineering cases confirm the necessity of the time effect on the porosity. The change of consolidation coefficient C_v cannot be ignored when suffering a larger overlying load. At the same time, it is proved that it is necessary to consider the process of porosity ratio e and seepage coefficient k changing with time by comparing with other modified consolidation theories.

Keywords: permeability coefficient; porosity; consolidation state; consolidation stress; time-history

中国的交通网络不断发展,高速铁路网由“四纵四横”发展为“八纵八横”,软土路基上高速公路、铁路等工程建设问题也越来越多。其中,路基沉降是工程质量控制的关键环节,因此,准确合理的预测方法对软土路基的固结沉降非常重要。经典太沙基(Terzaghi)一维固结理论能快速地预估地基沉降,但常常与实测值存在较大的误差^[1-2]。主要原因是 Terzaghi 一维固结理论是基于常固结系数 C_v 的假设,而实际上,在固结过程中,固结系数 C_v 中的渗透系数 k 、压缩系数 a_v 以及孔隙比 e 都会随着固结应力和时间发生变化。

20 世纪末,Ducan^[1] 和 Olson^[2] 都曾指出,固结系数的不确定性是传统固结理论计算的局限性的根本原因。据此,Li 等^[3] 假设压缩系数和渗透系数同时变化,推导了在线性加载过程中黏土的一维非线性固结方程。Dumais 等^[4] 通过非线性有效应力、孔隙比及渗透系数之间的关系,推导了融化土固结的一维计算模型。Cai 等^[5] 利用双曲线拟合方法,得到了一种修正的固结系数预测模型。Li 等^[6] 研究了固结系数随固结应力及时间的变化规律,发现随着固结应力的增加,固结系数并非单调的变化趋势,而是先增后减。Liu 等^[7] 和 Desai 等^[8-9] 利用修正剑桥本构模型来描述土体固结行为。王珏等^[10] 发现一维固结沉降的发展与土体参数及荷载相关,弹性模量越大,沉降量越小;黏弹性体的延迟时间越大,固结变化越慢。阮永芬等^[11] 认为土体的沉积作用和应力历史会影响地基固结沉降的确定。夏长青等^[12] 和胡安峰等^[13] 认为固结过程中压缩性与渗透性线性相关,推导出了饱和软土地基一维非线性固结解析解。

目前,学者们对于 Terzaghi 一维固结理论已开展了很多研究,部分学者^[14-17] 在研究固结系数 C_v 的变化时,认为孔隙比 e 的变化由固结应力大小和固

结状态决定,而孔隙比 e 在固结过程中随时间的变化方面的研究还相对缺乏。针对上述问题,笔者考虑了在固结应力作用下固结系数 C_v 的变化、孔隙比 e 随时间的变化,同时也考虑了土的固结状态(正常固结土、超固结土、欠固结土)及修正后的渗透系数预测公式,得到修正的 Terzaghi 一维固结理论。首先,基于工程常用的 5 种渗透系数预测公式和侧限压缩量公式,结合不同初始固结状态的 e -lg p 压缩曲线关系,对 5 种渗透系数预测公式进行修正,构建了考虑渗透系数随时间变化及固结应力影响的渗透系数预测公式 k_t ,再将所构建的渗透系数计算式代入固结系数 C_v 中,对经典 Terzaghi 一维固结理论进行修正;然后,利用高俊等^[14]、张乐等^[15] 的试验数据探究预测公式的适用性和可靠性;最后,通过工程案例讨论修正后的 Terzaghi 一维固结理论的合理性,并与不考虑时间的固结方程进行对比。

1 渗透系数预测公式的修正

1.1 考虑渗透系数与时间的相关性

以孔隙比、颗粒直径和级配等重要影响因素^[18-19] 所构建的渗透系数预测公式为基础,考虑时间相关性,如达西渗透系数公式、柯森-卡门渗透系数公式、太沙基渗透系数公式、中国水利水电科学研究院渗透系数公式、斯托克斯孔隙流渗透系数公式等^[20]。结合固结度和侧限压缩量的关系,推导出固结应力作用下某一时刻 t 孔隙比 e_t 的表达式,同时,考虑土的初始固结状态(正常固结土、超固结土、欠固结土),对上述渗透系数预测公式进行修正,构建考虑渗透系数随时间变化及固结应力影响的渗透系数预测公式。

1) 达西渗透系数预测公式

$$k = \frac{\beta d^2 \gamma_w}{\lambda \mu} \frac{e^2}{1+e} \quad (1)$$

式中: d 为颗粒粒径,cm; β 为颗粒的球体系数,圆球

时取 $\pi/6$; λ 为邻近颗粒的影响系数,圆球取 3π 。

2) 柯森-卡门渗透系数预测公式

$$k = \frac{c_2 \rho_{wz}}{s^2 \eta} \frac{e^3}{1+e} \quad (2)$$

式中: ρ_{wz} 为自由水的密度, g/cm^3 ; c_2 为与颗粒形状及水的实际流动方向有关的系数, 约为 0.125; s 为土颗粒的比表面积, cm^{-1} ; η 为自由水的动力黏滞系数, $\text{g} \cdot \text{s}/\text{cm}^2$ 。

3) 太沙基渗透系数预测公式

$$k = 2d_{10}^2 e^2 \quad (3)$$

式中: d_{10} 为粒径分布曲线上纵坐标为 10% 时所对应的土颗粒粒径, cm 。

4) 中国水利水电科学研究院渗透系数预测公式

$$k = 234d_{20}^2 \frac{e^3}{(1+e)^3} \quad (4)$$

式中: d_{20} 为粒径分布曲线上纵坐标为 20% 时所对应的土颗粒粒径, cm 。

5) 斯托克斯孔隙流渗透系数预测公式

$$k = \frac{\gamma_{wz} R^2}{8\eta} \frac{e}{1+e} \quad (5)$$

式中: R 为毛细管的半径, cm 。

在实际工程中, 上述预测公式中土的物理参数往往不易测得, 且在固结过程中一般不会发生变化, 而初始渗透系数 k_0 和初始孔隙比 e_0 可以由勘测资料获得, 因此, 用 k_0 和 e_0 对上述参数进行代换。

$$\frac{\beta d^2 \gamma_w}{\lambda \mu} = k_0 \frac{1+e_0}{e_0^2} \quad (6)$$

$$\frac{c_2 \rho_{wz}}{s^2 \mu} = k_0 \frac{1+e_0}{e_0^3} \quad (7)$$

$$d_{10}^2 = k_0 \frac{1}{e_0^2} \quad (8)$$

$$234d_{20}^2 = k_0 \frac{(1+e_0)^3}{e_0^3} \quad (9)$$

$$\frac{\gamma_{wz} R^2}{8\eta} = k_0 \frac{1+e_0}{e_0} \quad (10)$$

再分别将式(6)~式(10)代入式(1)~式(5)中, 得到的渗透系数预测式(11)~式(15)能基于初始渗透系数 k_0 和初始孔隙比 e_0 对土的渗透系数进行快速准确地计算。

$$k_t = k_0 \frac{1+e_0}{e_0^2} \frac{e_t^2}{1+e_t} \quad (11)$$

$$k_t = k_0 \frac{1+e_0}{e_0^3} \frac{e_t^3}{1+e_t} \quad (12)$$

$$k_t = k_0 \frac{1}{e_0^2} e_t^2 \quad (13)$$

$$k_t = k_0 \frac{(1+e_0)^3}{e_0^3} \frac{e_t^3}{(1+e_t)^3} \quad (14)$$

$$k_t = k_0 \frac{1+e_0}{e_0} \frac{e_t}{1+e_t} \quad (15)$$

式中: k_t 为某一时间 t 的渗透系数; e_t 为某一时刻 t 的孔隙比。

在固结过程中, 孔隙比 e_t 会随时间逐渐达到 e_∞ , 因此, 为了体现孔隙比 e_t 与时间的相关性, 需要加入固结度 U_t 这一概念。所谓固结度 U_t , 是指在某一时间 t 后, 土体发生固结或者孔压消散的程度。

$$S_t = U_t S_\infty \quad (16)$$

式中: S_t 是某一时刻的沉降量; S_∞ 是固结完成后的沉降量。

将侧限压缩量公式代入式(16), 然后将式(17)整理, 得到某一时间 t 的孔隙比 e_t 的表达式式(18)。

$$\frac{e_0 - e_t}{1+e_0} H = U_t \frac{e_0 - e_\infty}{1+e_0} H \quad (17)$$

$$e_t = e_0 - U_t (e_0 - e_\infty) \quad (18)$$

式中: e_∞ 是固结完成后的孔隙比。

将式(18)代入式(11)~式(15), 得到修正后的渗透系数预测公式

$$k_t = k_0 \frac{1+e_0}{e_0^2} \frac{[e_0 - U_t (e_0 - e_\infty)]^2}{1+e_0 - U_t (e_0 - e_\infty)} \quad (19)$$

$$k_t = k_0 \frac{1+e_0}{e_0^3} \frac{[e_0 - U_t (e_0 - e_\infty)]^3}{1+e_0 - U_t (e_0 - e_\infty)} \quad (20)$$

$$k_t = k_0 \frac{(1+e_0)^3}{e_0^3} \frac{[e_0 - U_t (e_0 - e_\infty)]^3}{[1+e_0 - U_t (e_0 - e_\infty)]^3} \quad (21)$$

$$k_t = k_0 \frac{1+e_0}{e_0} \frac{e_0 - U_t (e_0 - e_\infty)}{1+e_0 - U_t (e_0 - e_\infty)} \quad (22)$$

$$k_t = k_0 \frac{1+e_0}{e_0} \frac{e_0 - U_t (e_0 - e_\infty)}{1+e_0 - U_t (e_0 - e_\infty)} \quad (23)$$

根据式(19)~式(23)可知, 渗透系数 k_t 是关于固结度 U_t (时间相关) 和孔隙比 e_∞ 的函数, 而孔隙比 e_∞ 需要由固结应力和土的初始固结状态共同确定。不同土的初始固结状态不同, e - $\lg p$ 压缩曲线也不同, 因此, 还需要对不同土的初始固结状态进行讨论。

1.2 考虑固结状态及固结应力

土层的不同固结状态对应着不同的 e - $\lg p$ 压缩曲线, 根据前期固结应力 σ_c 和现有有效应力 σ_0 的关系, 可将土体分为正常固结土, 超固结土和欠固结土。

正常固结土的压缩曲线如图 1 所示。

$$e_\infty = e_0 - C_c \lg \frac{\sigma_0 + \Delta\sigma}{\sigma_0} \quad (24)$$

式中: C_c 为压缩指数。

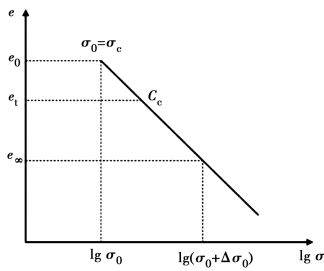


图 1 正常固结状态的 e - $\lg p$ 压缩曲线

Fig. 1 e - $\lg p$ compression curve of normal consolidation state

超固结土的压缩曲线如图 2 所示。

当 $\sigma_0 \leq \sigma_0 + \Delta\sigma \leq \sigma_c$ 时, 有

$$e_{\infty} = e_0 - C_c \lg \frac{\sigma_0 + \Delta\sigma}{\sigma_0} \quad (25)$$

当 $\sigma_0 + \Delta\sigma \geq \sigma_c$ 时, 有

$$e_{\infty} = e_0 - \left(C_c \lg \frac{\sigma_c}{\sigma_0} + C_c \lg \frac{\sigma_0 + \Delta\sigma}{\sigma_c} \right) \quad (26)$$

式中: C_c 为回弹指数。

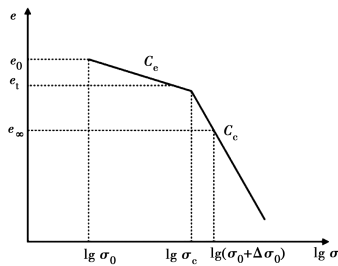


图 2 超固结状态的 e - $\lg p$ 压缩曲线

Fig. 2 e - $\lg p$ compression curve under over consolidation state

欠固结土的压缩曲线如图 3 所示。

$$e_{\infty} = e_0 - C_c \lg \frac{\sigma_0 + \Delta\sigma}{\sigma_c} \quad (27)$$

通过不同的 e - $\lg p$ 压缩曲线, 得到固结应力下相应的孔隙比 e_{∞} 。再分别将式(24)~式(27)代入式(19)~式(23)中, 便可得到针对不同土初始固结状态下的渗透系数公式。例如: 正常固结土的柯森-卡门渗透系数修正公式

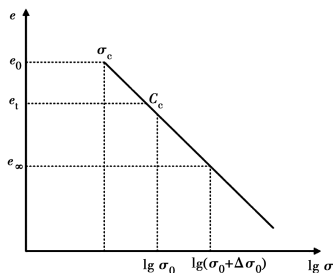


图 3 欠固结状态的 e - $\lg p$ 压缩曲线

Fig. 3 e - $\lg p$ compression curve of under consolidated state

$$k_t = k_0 \frac{1 + e_0}{e_0^3} \frac{\left(e_0 - U_t C_c \lg \frac{\sigma_0 + \Delta\sigma}{\sigma_0} \right)^3}{1 + e_0 - U_t C_c \lg \frac{\sigma_0 + \Delta\sigma}{\sigma_0}} \quad (28)$$

由式(28)求渗透系数 k_t , 最后还需要确定固结度 U_t 。因此, 接下来介绍经典太沙基(Terzaghi)一维固结理论, 并对其进行修正, 最后与上述修正后的渗透系数公式进行联立求解。

2 Terzaghi 一维固结理论修正

Terzaghi 固结理论假定, 对于饱和土来说, 在 d_t 时间内单元体体积的减小应变等于单元体中水的净流出流量, 即

$$\frac{\partial q}{\partial z} = m_v \frac{\partial u}{\partial t} \quad (29)$$

式中: m_v 为体积压缩系数。

在 t 时刻通过单元体的流量

$$q = k_t i = k_t \frac{\partial h}{\partial z} = \frac{k_t}{\gamma_w} \frac{\partial u}{\partial z} \quad (30)$$

将式(30)代入式(29)即可得

$$\frac{\partial u}{\partial t} = C_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad (31)$$

$$C_v = k(1 + e_0) / a_v \gamma_w \quad (32)$$

根据边界条件及初始条件

$$t=0, 0 \leq z \leq H \text{ 时, } u_0 = p$$

$$0 < t < \infty, z=0 \text{ 时, } u=0$$

$$0 < t < \infty, z=H \text{ 时, } q=0$$

$$t=\infty, z=H \text{ 时, } u=0$$

将对应的修正渗透系数公式代入式(31)、式(32), 采用分离变量法便可得一维固结计算公式, 例如: 基于柯森-卡门渗透系数预测公式的正常固结土一维固结计算公式

$$u'_z = \frac{4}{\pi} p \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{m} \sin\left(\frac{m\pi z}{2H}\right) \exp\left[-m^2 \frac{\pi^2 t(1+e_0)}{4a_v \gamma_w H^2}\right] \cdot \left[k_0 \frac{1+e_0}{e_0^3} \frac{\left(e_0 - U'_t C_c \lg \frac{\sigma_0 + \Delta\sigma}{\sigma_0} \right)^3}{1 + e_0 - U'_t C_c \lg \frac{\sigma_0 + \Delta\sigma}{\sigma_0}} \right] \quad (33)$$

$$U'_t = 1 - \frac{8}{\pi^2} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{m^2} \exp\left[-m^2 \frac{\pi^2 t(1+e_0)}{4a_v \gamma_w H^2}\right] \cdot \left[k_0 \frac{1+e_0}{e_0^3} \frac{\left(e_0 - U'_t C_c \lg \frac{\sigma_0 + \Delta\sigma}{\sigma_0} \right)^3}{1 + e_0 - U'_t C_c \lg \frac{\sigma_0 + \Delta\sigma}{\sigma_0}} \right] \quad (34)$$

$$k'_t = k_0 \frac{1+e_0}{e_0^3} \frac{\left(e_0 - U'_t C_c \lg \frac{\sigma_0 + \Delta\sigma}{\sigma_0} \right)^3}{1 + e_0 - U'_t C_c \lg \frac{\sigma_0 + \Delta\sigma}{\sigma_0}} \quad (35)$$

式中: u_z 为深度 z 处的孔压($z=1,3,5,7\cdots$)。

由此发现,无穷级数式(34)其实是一个关于(U_t, t)的隐函式,因此,可对其进行求解。采用 Matlab 对式(33)~式(35)及其他基于不同预测公式的一维固结公式进行编程求解,从而得到某一时间 t 修正后的固结度,最后把固结度代入对应的孔压公式和渗透系数公式中,便可以得到修正后某一时刻 t 的孔隙水压 u_z 和渗透系数 k_t 的预测值。在同时考虑了固结状态和固结应力的基础上,修正后的一维固结计算公式还考虑了渗透系数随时间变化的过程,更加符合土的实际固结过程,为预测地基固结提供了一种更为精确的计算方法。

3 适用性和准确性研究

利用高俊等^[14]和张乐等^[15]的试验数据,对预测公式的适用性和准确性进行讨论。

3.1 算例 1

采用高俊等^[14]的试验数据,试验土样来源于宁夏引黄灌区东干渠沙壤土,初始孔隙比 $e_0=0.76$,初始渗透系数 $k_0=12.56 \times 10^{-5}$ cm/s,压缩指数 $C_c=0.19$,前期固结应力 75 kPa,正常固结土(OCR=1)。在试样饱和后,各级固结压力值分别为 25、50、100、200、400、800、1 200 kPa,每级加载时间为 $t=24$ h,试样高度 $H=4$ cm,单面排水。

图 4 为采用式(19)~式(23)渗透系数公式计算结果与高俊等^[14]的试验数据的对比。结果表明,基于中国水利水电科学研究院渗透系数修正公式的预估值与高俊等^[14]的试验数据最为吻合。因此,对于预测沙壤土的固结,使用基于中国水利水电科学研究院渗透系数的修正公式更适合,计算结果更准确。

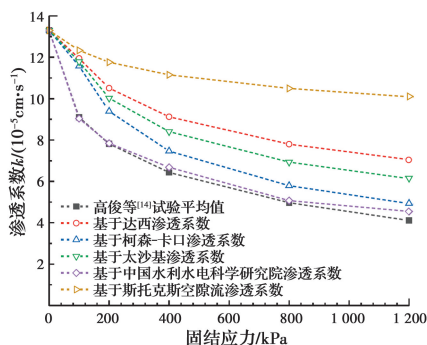


图 4 渗透系数与固结应力的关系曲线

Fig. 4 Relation curve between permeability coefficient and consolidation stress

3.2 算例 2

采用张乐等^[15]的试验数据,试验土样为陕西洛

川 Q3 黄土,取土深度为 7~8 m(粉质黏土)。初始孔隙比 $e_0=0.93$,初始渗透系数 $k_0=1.25 \times 10^{-5}$ cm/s,压缩指数 $C_c=0.89$,前期固结应力 115 kPa,正常固结土(OCR=1)。在试样饱和后,利用 GDS 高级加载模块对正常固结土进行固结应力为 140、165、190、215 kPa 下的固结试验,每级加载总时长为 $t=24$ h,试样高度 $H=8$ cm,双面排水。

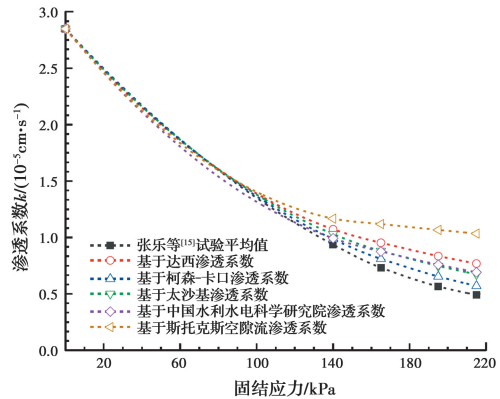


图 5 渗透系数与固结应力的关系曲线

Fig. 5 Relation curve between permeability coefficient and consolidation stress

图 5 为采用式(19)~式(23)渗透系数公式计算结果与张乐等^[15]试验数据的对比。结果表明,基于柯森-卡门渗透系数修正公式的预估值与张乐等^[15]的试验数据最为接近。因此,对于预测粉质黏土的固结,使用基于柯森-卡门渗透系数的修正公式更适合,计算结果更准确。

4 工程应用案例分析

公路路基为 10 m 厚的粉质黏土层,初始孔隙比为 0.8,初始渗透系数为 2 cm/a,压缩系数为 2.5×10^{-4} kPa⁻¹,先期固结应力为 110 kPa。采用堆载压实固结法,假定上覆均布荷载为 200、500、800、1 200 kPa,如图 6 所示,利用修正前后的 Terzaghi 一维固结理论,讨论修正前后的 Terzaghi 一维固结方程预测的路基固结度、沉降及孔压的异同,最后与高俊等^[14]、张乐等^[15-16]不考虑时间的固结方程计算结果进行对比。

4.1 修正前后的 Terzaghi 一维固结理论对比

图 7 为在上覆均布荷载为 200、500、800、1 200 kPa 时,修正前后的 Terzaghi 一维固结方程预测的路基固结度 U_t-t 关系曲线。由图 7 可以发现,经典 Terzaghi 一维固结方程无法考虑固结应力,即上覆均布荷载为 200、500、800、1 200 kPa 所对应的 U_t-t 关系曲线相同。显然,这与实际工程情况不符,往往

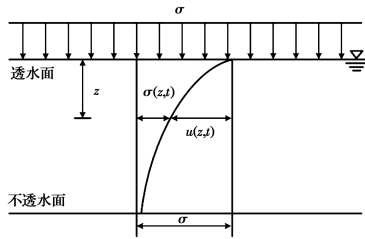


图 6 计算模型示意图

Fig. 6 Schematic diagram of calculation model

上覆荷载越大,所需固结时间越长,因为上覆荷载越大,孔隙比 e 会随着固结时间的推移变得越来越小,渗透系数也会越来越小,导致排水越来越困难,因此,需要更长的固结时间。这刚好与修正后的 Terzaghi 一维固结方程预测的 U_t-t 关系曲线一致。当固结度达到 80% 时,上覆均布荷载 200、500、800、1 200 kPa 所对应的时间 t 分别为 4.56、5.52、6.12、9.23 a。而经典 Terzaghi 一维固结方程却无法考虑固结应力的影响。

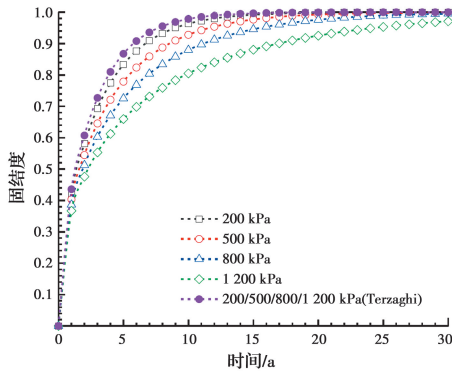


图 7 固结度与时间的关系曲线

Fig. 7 Relation curve between consolidation degree and time

图 8 为在上覆均布荷载为 200、500、800、1 200 kPa 时,修正前后的 Terzaghi 一维固结方程预测的路基沉降 S_t-t 关系曲线。可以发现,最终的沉降值随着上覆荷载的增大而增大,分别是 0.278、0.694、1.111、1.666 m。同时也发现,当上覆均布荷载较小(200 kPa)时,修正前后的 S_t-t 关系曲线较为一致,但当上覆均布荷载较大时(1 200 kPa),修正前后的 S_t-t 关系曲线有着明显差异,修正后的 Terzaghi 一维固结方程预测的沉降值需要更长的时间达到稳定。其原因是孔隙比 e 和渗透系数 k_t 受到上覆均布荷载的影响,即固结应力的影响,荷载越大,需要趋于稳定的时间也越长。

图 9 为在上覆均布荷载为 200、500、800 以及 1 200 kPa 时,修正前后的 Terzaghi 一维固结方程预测的路基深度 $z=5$ m 处超孔隙水压 u_z-t 关系曲线。

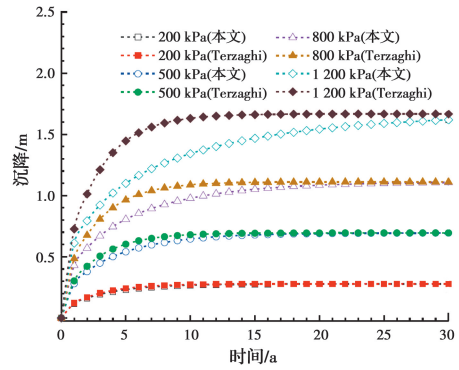


图 8 沉降与时间的关系曲线

Fig. 8 Relationship curve between settlement and time

可以发现,在固结初期,由于孔隙比和渗透系数比较大,孔隙水压消散得较快,随着时间的推移,土体逐渐被压缩,孔隙比和渗透系数变小,孔隙水压消散也逐渐平缓。同时也发现,当上覆均布荷载较小时(小于 500 kPa),修正前后的 u_t-t 关系曲线较为一致,但当上覆均布荷载较大时(大于 500 kPa),修正前后的 u_t-t 关系曲线有着明显差异,修正后的 Terzaghi 一维固结方程预测的孔隙水压需要更长的时间消散。

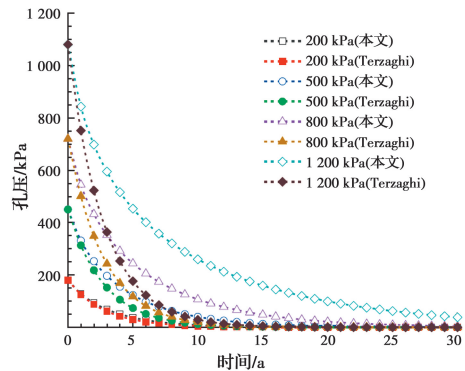


图 9 孔隙与时间的关系曲线

Fig. 9 Relationship curve between pore pressure and time

4.2 一维修正固结理论对比

将 Terzaghi、高俊等^[14]、张乐等^[15-16]和修正的一维固结方程在上覆均布荷载为 1 200 kPa 时的固结度 U_t-t 、沉降 S_t-t 及孔隙 u_t-t 的关系曲线进行对比,如图 10 所示。可以发现,虽然高俊等^[14]、张乐等^[15-16]的固结方程和修正一维固结方程的计算结果都滞后于 Terzaghi 一维固结方程,但高俊等^[14]、张乐等^[15-16]的固结方程需要更长的时间趋于稳定。其原因是高俊等^[14]、张乐等^[15-16]忽略了孔隙比 e 和渗透系数 k 与时间的相关性,认为其仅仅与固结状态和固结应力有关,导致孔隙比 e 和渗透系数 k 的预测值偏小,进而需要更长的时间完成固结,低估了固

结速率。在实际工程中,对于固结速率的预估偏小,将不可避免地给施工过程和后期使用带来风险。因此,在预估路基固结沉降速率时,时间是不可忽视的因素之一,尤其是在上覆荷载较大、孔隙比变化较大时。

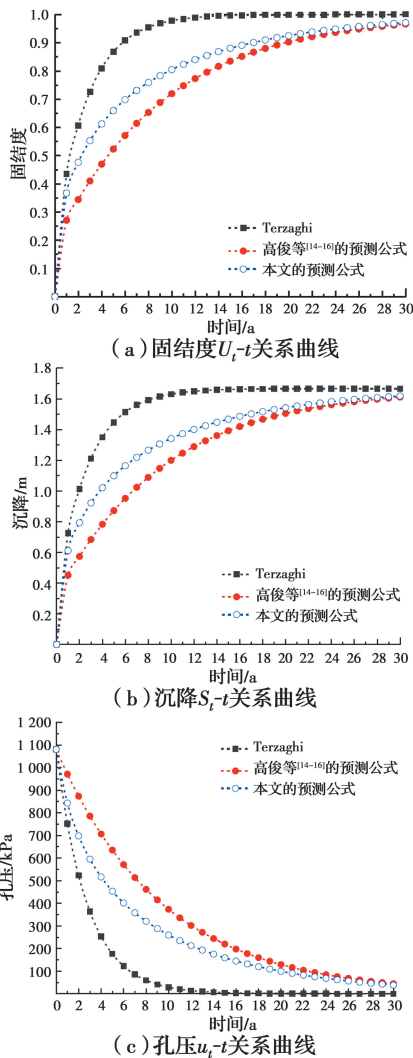


图 10 一维固结理论对比关系曲线

Fig. 10 Comparison curve of one-dimensional consolidation theory

综上所述,若上覆荷载较小时,经典 Terzaghi 一维固结方程依然有效,可以忽略固结系数 C_v 的变化对固结度、沉降及孔压的影响;但当上覆荷载较大时,则不能忽视固结系数 C_v 的变化,同时还需要考虑时间的变化。修正后的 Terzaghi 一维固结方程,同时考虑了固结状态、固结应力及孔隙比变化的影响,因此,修正后的 Terzaghi 一维固结方程能更真实地反映固结过程,为预测地基固结提供了一种更为精确的计算方法。

5 结论

1) 基于工程常用的 5 种渗透系数预测模型,结合固结度和侧限压缩量的关系,推导出孔隙比 e_t 的时间函数,构建了渗透系数与时间及固结应力依赖的计算公式。将所构建的渗透系数计算式代入固结系数 C_v 中,同时考虑固结状态、固结应力及时间的影响,对经典 Terzaghi 一维固结理论进行修正。

2) 利用已有的试验数据,验证了预测公式的准确性。推荐基于中国水利水电科学研究院渗透系数的修正公式去预测正常固结沙壤土的固结,以及采用基于柯森-卡门渗透系数的修正公式去预估正常固结粉质黏土的固结过程。

3) 修正后的 Terzaghi 一维固结方程同时考虑了渗透系数随时间变化及固结应力对固结系数 C_v 的影响,因此,能更加真实地反映固结过程。案例分析表明,若上覆荷载较小时(小于 500 kPa),经典 Terzaghi 一维固结方程依然有效,可以忽略固结系数 C_v 的变化对固结度、沉降及孔压的影响;但当上覆荷载较大时(大于 500 kPa),则不能忽视固结系数 C_v 的变化,另外,在与不考虑时间的固结方程对比时,发现在上覆荷载较大时,时间是不可忽视的因素之一。因此,修正后的 Terzaghi 一维固结方程更符合工程实际。

参考文献:

[1] DUNCAN J M. Limitations of conventional analysis of consolidation settlement [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1993, 119(9): 1333-1359.

[2] OLSON R E. Settlement of embankment on soft clays [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1998, 124(4): 278-288.

[3] DUMAIS S, KONRAD J M. One-dimensional large-strain thaw consolidation using nonlinear effective stress-void ratio-hydraulic conductivity relationships [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2018, 55: 414-426.

[4] LI C X, HUANG J S, WU L Z, et al. Approximate analytical solutions for one-dimensional consolidation of a clay layer with variable compressibility and permeability under a ramp loading [J]. International Journal of Geomechanics, 2018, 18(11): 06018032.

[5] CAI G J, LIU L L, LIU X Y, et al. Prediction of the coefficient of consolidation of soil via the hyperbolic fitting method during piezocone dissipation test [J]. International Journal of Geomechanics, 2020, 20(10): 06020026

- [6] LI B, FANG Y G, OU Z F. Asymptotic solution for the one-dimensional nonlinear consolidation equation including the pore evolution effect [J]. *International Journal of Geomechanics*, 2018, 18(10): 04018125.
- [7] LIU M D, CARTER J P. A structured Cam Clay model [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2002, 39(6): 1313-1332.
- [8] DESAI C S. Constitutive modeling of materials and contacts using the disturbed state concept. Part 1-Background and analysis [J]. *Computer and Structures*, 2015, 146:214-233.
- [9] DESAI C S. Constitutive modeling of materials and contacts using the disturbed state concept: Part 2-Validations at specimen and boundary value problem levels [J]. *Computers & Structures*, 2015, 146: 234-251.
- [10] 王珏, 童立红, 金立, 等. 任意荷载下连续排水边界分数阶黏弹性地基一维固结模型[J]. *土木与环境工程学报(中英文)*, 2020, 42(1):56-63.
WANG J, TONG L H, JIN L, et al. One-dimension consolidation mode of fractional order viscoelastic subgrade with continuous drainage boundary under time-dependent loading [J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2020, 42(1): 56-63. (in Chinese)
- [11] 阮永芬, 徐梦天源, 刘克文, 等. 沉积作用及应力历史对自重应力和沉降的影响[J]. *土木建筑与环境工程*, 2017, 39(2): 155-161.
RUAN Y F, XU M T Y, LIU K W, et al. Influence of sedimentation and stress history on computation of gravity stress and settlement [J]. *Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering*, 2017, 39(2): 155-161. (in Chinese)
- [12] 夏长青, 胡安峰, 崔军, 等. 饱和软土成层地基一维非线性固结解析解[J]. *岩土力学*, 2018, 39(8): 2858-2864.
XIA C Q, HU A F, CUI J, et al. Analytical solutions for one-dimensional nonlinear consolidation of saturated soft layered soils [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2018, 39(8): 2858-2864. (in Chinese)
- [13] 胡安峰, 周禹杉, 陈缘, 等. 结构性土一维非线性大应变固结半解析解[J]. *岩土力学*, 2020, 41(8): 2583-2591.
HU A F, ZHOU Y S, CHEN Y, et al. Semi-analytical solutions for one-dimensional nonlinear large strain consolidation of structured soft clay [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2020, 41(8): 2583-2591. (in Chinese)
- [14] 高俊, 党发宁, 丁九龙, 等. 考虑初始固结状态影响的软基固结计算方法研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2019, 38(Sup1): 3189-3196.
GAO J, DANG F N, DING J L, et al. Research on soft soil consolidation calculation method considering the impacts of initial consolidation state [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2019, 38(Sup1): 3189-3196. (in Chinese)
- [15] 张乐, 党发宁, 高俊, 等. 线性加载条件下考虑应力历史的饱和黏土一维非线性固结渗透试验研究[J]. *岩土力学*, 2021, 42(4): 1078-1087.
ZHANG L, DANG F N, GAO J, et al. Experimental study on the one-dimensional nonlinear consolidation and seepage of saturated clay considering stress history under ramp loading [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2021, 42(4): 1078-1087. (in Chinese)
- [16] 张乐, 党发宁, 高俊, 等. 考虑应力历史的饱和黏土一维固结渗透试验研究[J]. *水力发电学报*, 2021, 40(4): 84-96.
ZHANG L, DANG F N, GAO J, et al. Experimental study on 1-D consolidation permeability of saturated clay considering stress history [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2021, 40(4): 84-96. (in Chinese)
- [17] 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): 106-108, 112.
LIN P, XU Z H, XU P, et al. Research on coefficient of consolidation of soft clay under compression [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2003, 24(1): 106-108, 112. (in Chinese)
- [18] 唐红梅, 王林峰, 闫凝. 不同密度下砂砾土的渗透系数试验分析[J]. *路基工程*, 2020(6): 19-24.
TANG H M, WANG L F, YAN N. Experimental analysis of permeability coefficient of sandy gravel soil under different density [J]. *Subgrade Engineering*, 2020(6): 19-24. (in Chinese)
- [19] 黄达, 曾彬, 王庆乐. 粗粒土孔隙比及级配参数与渗透系数概率的相关性研究[J]. *水利学报*, 2015, 46(8): 900-907.
HUANG D, ZENG B, WANG Q L. Study on probabilistic relation between permeability coefficient and void ratio and grain composition of coarse grained soils using copula theory [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2015, 46(8): 900-907. (in Chinese)
- [20] 党发宁, 刘海伟, 王学武, 等. 基于有效孔隙比的黏性土渗透系数经验公式研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2015, 34(9): 1909-1917.
DANG F N, LIU H W, WANG X W, et al. Empirical formulas of permeability of clay based on effective pore ratio [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2015, 34(9): 1909-1917. (in Chinese)