https://doi.org/10.3799/dqkx.2020.184



# 应力历史对饱和软土固结系数的影响

王江锋1,袁 威1,何 况2,郑培信3

- 1. 华北水利水电大学地球科学与工程学院,河南郑州,450045
- 2. 郑州地铁集团有限公司,河南郑州,450046
- 3. 河南省尧栾西高速公路建设有限公司,河南郑州,450046

摘 要:为了探究不同固结状态下的饱和软土固结系数的变化规律,在太沙基固结理论的基础上,利用渗透系数和孔隙比的关系,孔隙比和固结应力的关系,分别推导出了在正常固结和超固结状态下固结系数( $C_v$ )随固结应力变化的关系式,将关系式代入 Terzaghi 方程,进而获得考虑应力历史和固结应力影响的修正 Terzaghi 一维固结方程;通过室内固结试验和工程应用分析对固结系数关系式和修正的 Terzaghi 一维固结方程的准确性进行验证.结果表明,对于正常固结的软土,当固结应力小于前期固结应力时,固结系数随应力的增大而增大;当固结应力大于前期固结应力时,固结系数随应力的增大而增大;当固结应力大于前期固结应力时,固结系数随应力的增大而减小.对于超固结状态的软土,固结系数随应力的增大而增大,最后趋于平缓.当上覆荷载较小时,修正前后的 Terzaghi 一维固结方程计算结果相近;但当上覆荷载较大时,修正后的 Terzaghi 一维固结方程计算的固结度明显滞后于修正前的计算结果.前期的应力历史和后期的固结应力对软土固结系数的影响是不容忽视的,修正后的 Terzaghi 一维固结方程更能真实反映土体的固结性状.

关键词:饱和软土;固结系数;前期固结应力;应力历史;超固结比;工程地质.

中图分类号: P642 文章编号: 1000-2383(2020)12-4640-09

收稿日期:2020-05-27

# Influence of Stress History on Consolidation Coefficient of Saturated Soft Soil

Wang Jiangfeng<sup>1</sup>, Yuan Wei<sup>1</sup>, He Kuang<sup>2</sup>, Zheng Peixin<sup>3</sup>

- 1. College of Earth Sciences and Engineering, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450045, China
- 2. Zhengzhou Metro Group Co., Ltd., Zhengzhou 450046, China
- 3. Henan yaoluanxi Expressway Construction Co., Ltd., Zhengzhou 450046, China

**Abstract:** To explore the changing law of the consolidation coefficient of saturated soft soil under different consolidation states, based on Terzaghi's consolidation theory, using the relationship between permeability coefficient and void ratio, void ratio, and consolidation stress, the relationship between consolidation coefficient ( $C_v$ ) and consolidation stress under normal consolidation and over consolidation is derived. The modified Terzaghi one-dimensional consolidation equation considering the influence of stress history and consolidation stress is obtained by substituting the relationship into the Terzaghi equation; The accuracy of the consolidation coefficient relation and the modified Terzaghi one-dimensional consolidation equation were verified by laboratory consolidation test and engineering application analysis. When the consolidation stress is larger, the results show that for normally consolidated soft soil when the consolidation stress is less than the previous consolidation stress, the consolidation coefficient increase of stress. When the consolidation stress is larger than the previous consolidation stress, the consolidation coefficient decreases with the increase of the stress. For over consolidated soft soil, the coefficient of consolidation

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No.U1704243).

作者简介:王江锋(1976-),男,博士,副教授,从事隧道与地下工程、岩土加固与测试等方面的科研与教学工作.ORCID:0000-0003-0029-9324. E-mail:398909366@qq.com

increases with the increase of stress and finally tends to be gentle. When the load is small, the calculation results of the Terzaghi one-dimensional consolidation equation before and after the modification are similar; but when the load is large, the consolidation degree of the corrected Terzaghi one-dimensional consolidation equation lags significantly behind the calculation result before the modification. The influence of the previous stress history and the later consolidation stress on the consolidation coefficient of soft soil can not be ignored. The modified Terzaghi one-dimensional consolidation equation can more truly reflect the consolidation behavior of soil.

**Key words:** saturated soft soil; consolidation coefficient; preconsolidation stress; stress history; over consolidation ratio(OCR); engineering geology.

在 Terzaghi(1943)固结理论中, 土体在固结过 程中渗透系数 k 和压缩系数 a 保持不变,即土体在 固结过程中固结系数是不变的.实际上饱和土在排 水固结过程中,应力场与渗流场是相互影响的,随 着有效应力的增大,孔隙比逐渐减小,土体渗透性 和压缩性均减小.对于固结系数  $C_v = k(1+e_0)/a_v \gamma_w$ , 渗透性的减小会使 $C_n$ 减小,而压缩性的减小会使 $C_n$ 增大,二者在固结过程中随应力水平同时变化,因 此在实际工程中需要考虑固结系数的变化对固结 沉降的影响. Zhu and Yin (2005)和 Sushil (2005, 2008)对固结系数 C<sub>v</sub>为定值的假定持否定的态度. Mesri and Ailouni(2007)通过总结多种软土的试验 数据得出,软土的次固结系数 $C_a$ 与压缩指数 $C_c$ 的比 值为一恒定值;吴雪婷(2013)研究了温州海相淤 泥, Lei et al. (2018)研究了天津海相软土, 陈波等 (2013)研究了上海海相沉积软黏土,加瑞和雷华阳 (2019)研究了日本有明黏土,桂跃等(2016)研究了 高原湖相泥炭土也发现软土固结系数 C<sub>v</sub>受应力水 平、加荷比、加载方式、各向异性和结构性的影响并 非常量,并且大部分是描述 $C_v$ 的变化趋势,并没有 给出具体的计算公式.章为民等(2015,2016)认为 固结过程中固结系数按加载周期循环重复,持续变 化的,变化幅度可达3个数量级,高俊等(2019)推导 了同时考虑初始固结状态和固结应力影响的软基 堆载预压过程中的渗透系数预测公式.众多学者 (林鹏等,2003;余闯和刘松玉,2004;吕卫清等, 2009)均认为对正常固结土,固结系数随应力水平 先增大,当固结应力达到100~200 kPa时,固结系 数达到最大,之后逐渐减小,最后趋于稳定,给出了 固结系数随应力水平的计算公式,但是不同初始固 结状态的软土固结系数随应力水平的变化不同.本 文从固结系数的定义出发,分别对两种状态下固结 系数随应力水平的关系进行推导,认为固结系数与 应力水平以及土体的超固结比有关.通过室内固结 试验及采用林鹏等(2003)的室内试验数据,进一步

验证所提出关系式的正确性.

## 1 固结系数与固结应力水平的关系

根据 Terzaghi 一维固结理论,在饱和软土层顶面下 z 深度处取一微元体.根据固结渗流的连续性条件,微元体在任一时间 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:

$$\frac{\partial e}{\partial t} = \frac{k(1+e_0)}{\gamma_w} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2},\tag{1}$$

式 (1)中: e为时间 t时的孔隙比; u为孔隙压力;  $\gamma_w$ 为水的重度;  $e_o$ 为初始孔隙比.

#### 1.1 正常固结状态下软土的固结系数

土体在上覆荷载作用下,土颗粒间相互挤压靠拢,土体内部的水和空气被挤压排出,孔隙体积逐渐减小,并且荷载越大,孔隙体积减小越多.正常固结土的压缩曲线如图1所示.

假设作用于土层中点自重应力为 $\sigma_0$ , $\sigma_c$ 为前期固结应力,该点所受的附加应力为 $\Delta\sigma$ ,实际所受应力为 $\sigma=\sigma_0+\Delta\sigma$ , $e_i$ 为对应的孔隙比,表达式为:

$$e = e_0 - C_c \lg \frac{\sigma_0 + \Delta \sigma}{\sigma_0}, \tag{2}$$

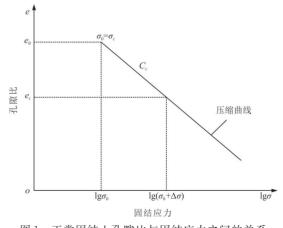


图1 正常固结土孔隙比与固结应力之间的关系ig 1 Relationship between porosity ratio of norm

Fig.1 Relationship between porosity ratio of normal consolidated soil and vertical stress

式(2)中:C。为压缩指数.

根据有效应力原理:

$$\sigma' = \sigma_0 + \Delta \sigma - u. \tag{3}$$

将(3)代入式(2)并对 u 进行求导得:

$$\frac{\partial e}{\partial u} = \frac{C_c}{\ln 10(\sigma - u)}. (4)$$

又有:

$$\frac{\partial e}{\partial t} = \frac{\partial e}{\partial u} \frac{\partial u}{\partial t}.$$
 (5)

将式(5)和式(4),代入式(1)得:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\ln 10k(1+e_0)}{\gamma_w C_c} (\sigma - u). \tag{6}$$

对照 Terzaghi 固结方程,可得:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\ln 10k(1+e_0)}{\gamma_{v_0}C_s} \sigma^{\prime}, \qquad (7)$$

由式(7)可以看出,只要考虑渗透系数 k在固结过程中的变化,就可以得到正常固结状态下土的固结系数随应力水平变化的关系式.实践表明,软土的渗透系数在固结过程中变化范围很大(葛勤等,2017),对固结过程产生较大的影响,根据大量的试验结果,对于 k- $\sigma$ '的变化特征,渗透系数随应力水平变化的关系式如下:

$$k = k_0 e^{-a\sigma'}. (8)$$

将式(8)代入式(7)得:

$$C_{v} = \frac{\ln 10(1 + e_{0})k_{0}}{\gamma_{w}C_{s}}e^{-a\sigma^{'}}, \qquad (9)$$

式(9)中: k。为前期固结压力时的渗透系数.

由式(9)得:

$$C_{v} = C_{vo} e^{-a\sigma'}. \tag{10}$$

大量的试验结果表明,对于正常固结状态下软 土的固结系数呈现出先增后减的变化趋势,基于 此,并且考虑前期应力的影响,笔者提出式(11),目 的是对这一规律定量化,给出其计算式即:

$$C_{v} = \begin{cases} C_{v0} \exp a_{1} \left( 1 - \frac{p_{c}}{\sigma'} \right), & p_{c} > \sigma' \\ C_{v0} & p_{c} = \sigma' \\ C_{v0} \exp a_{2} \left( \frac{p_{c}}{\sigma'} - 1 \right), & p_{c} < \sigma' \end{cases}$$

$$(11)$$

根据超固结比(OCR)定义:

$$OCR = p_c/p_0, \tag{12}$$

令:

$$OCR = \frac{p_c}{r} = R, \qquad (13)$$

将(13)代入(11),可得:

$$C_{v} = \begin{cases} C_{v0} \exp a_{1}(1-R), & R > 1 \\ C_{v0} & R = 1, \\ C_{v0} \exp a_{2}(R-1), & R < 1 \end{cases}$$
 (14)

式(14)中: $p_c$ 为前期固结压力( $\sigma_c = p_c$ ), $C_{vo}$ 为前期固结压力时的固结系数; $a_1$ , $a_2$ 为不同土体的修正系数.不同地域的软土有着不同的修正系数. $p_c$ , $C_{vo}$ 均可由固结试验直接得出, $a_1$ , $a_2$ 可利用式(14)通过对试验曲线拟合求得.因此,式(14)考虑了前期固结压力对固结系数的影响.比较式(9)和(14)发现,式(9)没有考虑前期固结压力对固结系数的影响,仅仅反映了曲线的变化趋势,而根据有效应力原理,随着固结的进行,有效应力不断增长,固结系数在前期固结压力附近有较大变化,应当考虑其对固结系数的影响.

#### 1.2 超固结状态下软土的固结系数

超固结土的压缩曲线如图 2 所示,相较于正常固结土,其压缩曲线分为再压缩曲线和现场压缩曲线。根据附加应力  $\Delta \sigma$ 的大小,土体实际所受的上部荷载  $\sigma = \sigma_0 + \Delta \sigma$ 有两种可能:

当 $\sigma_0$ + $\Delta\sigma$ 小于前期固结应力 $\sigma_0$ 时,与孔隙比变化关系如图 2a 所示,此时的孔隙比为:

$$e = e_0 - C_s \lg \frac{\sigma_0 + \Delta \sigma}{\sigma_0}. \tag{15}$$

当 $\sigma_0$ + $\Delta\sigma$ 大于前期固结应力 $\sigma_0$ 时,压缩曲线包括再压缩曲线和现场压缩曲线两部分,如图 2b 所示,对应的孔隙比为:

$$e = e_0 - \left( C_c \lg \frac{\sigma_c}{\sigma_0} + C_s \lg \frac{\sigma_0 + \Delta \sigma}{\sigma_0} \right), \quad (16)$$

式(16)中: C。为土的压缩指数; C。为土的回弹指数.

将式(3)代入式(15)和式(16),并对u进行求得导得:

$$\frac{\partial e}{\partial u} = \frac{C_s}{\ln 10(\sigma - u)},\tag{17}$$

和正常固结的推导过程相同,可得超固结状态下固结系数随应力水平的关系式:

$$C_v = \frac{\ln 10(1 + e_0) k_0}{\gamma_w C_s} e^{-a\sigma'}.$$
 (18)

大量的试验结果表明,对于超固结状态下软土的固结系数,随固结应力的增加呈现出先快速增加,后平缓增加,最后趋于稳定的变化规律,针对这一变化规律,笔者提出式(19)以方便计算超固结土在固结过程中的变化规律,即:

$$C_v = C_{v0} [1 - \exp(-a\sigma')],$$
 (19)

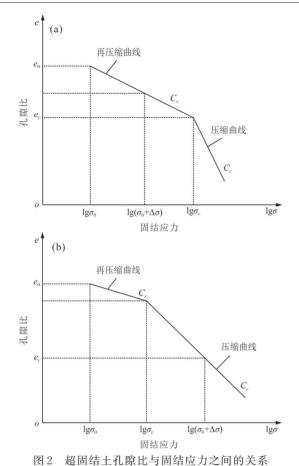


Fig.2 Relationships between porosity ratio of over consolidated soil and vertical stress  $a.\sigma_0 \leqslant \sigma_0 + \Delta \sigma \leqslant \sigma_c.b.\sigma_0 + \Delta \sigma \geqslant \sigma_c$ 

式(19)中: $C_{vo}$ 为前期固结压力时的固结系数;a为不同土样的修正系数,可利用式(19)通过对试验曲线拟合求得.

## 2 探究计算公式的适用性及可靠性

### 2.1 验证 1

采用河北沧州原状软土进行侧限压缩试验,采用薄壁取土器获得地表以下11.4~13.5 m处的原状试样,取样点位于地下水位以下.根据Casagrande法所确定的先期固结压力约为150 kPa,取样土层处于欠固结状态,其物理力学性质指标见表1.为使试样获得正常固结状态和超固结状态,先对试样进行预

压分级加载,然后进行固结试验,加载试验方案 见表2.

试验采用新型全自动高压固结仪,加载过程平稳,对试验的影响小,数据采集精度 0.001 mm. 固结试验加压开始 60 min 以内,土样的固结度已达 70%~80%以上(张仪萍,2002),因而求解固结系数通常只需用到 60 min 以内的数据.荷载作用时间维持 1 h,用时间平方根法测定固结系数,在实际工程中可用孔压静力触探求固结系数(孟高头等,2001).每组荷载两个平行样取平均值.所有试验操作均按照规程 GB/T 50123—2019(2019)进行.

图 3 比较了式(14)的计算值与试验值,根据试样的  $C_v$ — $\sigma$ '试验曲线,利用式(14),由最小二乘法可求得  $a_1$ =0.649,  $a_2$ =0.174.从图 3看出,式(14)计算值与试验结果有较好的吻合.拟合曲线考虑了前期固结压力对固结系数的影响,在固结过程中,当 OCR>1 时,固结系数随固结应力的增大而增大;当 OCR<1,固结系数随固结应力的增大而增太;当 OCR<1,固结系数随固结应力的增大而减小.

图 4 给出了试样在超固结状态下,固结系数随应力水平的变化规律,其中,a=0.01, $C_{vo}$ =0.6. 图 4中计算值与试验值都反映了固结系数随应力水平的变化规律,计算值与试验值接近,固结系数随固结应力的增大而增大,当固结应力 $\sigma$ =800 kPa时,对应的固结系数  $C_v$ =0.6×10<sup>-3</sup> cm²/s,约为初始固结系数的 2 倍,前后变化幅值较大,这也直接反映了本文研究的必要性.可采用本文所提出的考虑应力历史影响的固结系数拟合公式预估饱和软土在压缩过程中的变化规律.

#### 2.2 验证 2

采用林鹏等(2003)的试验数据及其本文的固结系数计算值,分别绘制了两种固结状态下固结系数随应力水平变化的关系曲线(图5、6).图5中根据土样3的固结系数与固结应力的试验曲线,利用式(14),可求得 $a_1$ =0.945, $a_2$ =0.134.图6中a=0.01.从图5和图6可以看出,计算结果与实测数据吻合得较好,拟合公式完全反映了前期应力历史及其应力水平对固结系数的影响.

表1 土的物理力学性质指标

Table 1 Physical and mechanical properties of soil

| 天然重度       | 含水率   | 塑性指数  | 液限    | 黏粒含量 | 孔隙比  | 压缩指数 | 回弹指数 |
|------------|-------|-------|-------|------|------|------|------|
| $(kn/m^3)$ | (%)   | (%)   | (%)   | (%)  |      | 压细钼奴 |      |
| 16.95      | 46.42 | 25.27 | 58.38 | 70.7 | 1.19 | 0.46 | 0.06 |

#### 表 2 试验方案

Table 2 Testing plans for consolidation test

| 固结状态     | 试样编号  | 加载路径(kPa)及持续时间   |  |  |
|----------|-------|--|--|--|
|          | 1,2   | $25(1 \text{ d}) \rightarrow 50(1 \text{ d}) \rightarrow 100(1 \text{ d}) \rightarrow 150(1 \text{ d}) \rightarrow 0 \rightarrow 50(60 \text{ min})$   |  |  |
|          | 3,4   | $25(1 \text{ d}) \rightarrow 50(1 \text{ d}) \rightarrow 100(1 \text{ d}) \rightarrow 150(1 \text{ d}) \rightarrow 0 \rightarrow 100(60 \text{ min})$  |  |  |
| 正常固结     | 5,6   | $25(1 \text{ d}) \rightarrow 50(1 \text{ d}) \rightarrow 100(1 \text{ d}) \rightarrow 150(1 \text{ d}) \rightarrow 0 \rightarrow 150(60 \text{ min})$  |  |  |
| 止吊凹绢     | 7,8   | $25(1 \text{ d}) \rightarrow 50(1 \text{ d}) \rightarrow 100(1 \text{ d}) \rightarrow 150(1 \text{ d}) \rightarrow 0 \rightarrow 50(60 \text{ min})$ $25(1 \text{ d}) \rightarrow 50(1 \text{ d}) \rightarrow 100(1 \text{ d}) \rightarrow 150(1 \text{ d}) \rightarrow 0 \rightarrow 100(60 \text{ min})$ $25(1 \text{ d}) \rightarrow 50(1 \text{ d}) \rightarrow 100(1 \text{ d}) \rightarrow 150(1 \text{ d}) \rightarrow 0 \rightarrow 150(60 \text{ min})$ $25(1 \text{ d}) \rightarrow 50(1 \text{ d}) \rightarrow 100(1 \text{ d}) \rightarrow 150(1 \text{ d}) \rightarrow 0 \rightarrow 200(60 \text{ min})$ $25(1 \text{ d}) \rightarrow 50(1 \text{ d}) \rightarrow 100(1 \text{ d}) \rightarrow 150(1 \text{ d}) \rightarrow 0 \rightarrow 400(60 \text{ min})$ $25(1 \text{ d}) \rightarrow 50(1 \text{ d}) \rightarrow 100(1 \text{ d}) \rightarrow 150(1 \text{ d}) \rightarrow 0 \rightarrow 800(60 \text{ min})$ $25(1 \text{ d}) \rightarrow 50(1 \text{ d}) \rightarrow 100(1 \text{ d}) \rightarrow 200(1 \text{ d}) \rightarrow 400(1 \text{ d}) \rightarrow 800(1 \text{ d}) \rightarrow 0 \rightarrow 50(60 \text{ min})$ $25(1 \text{ d}) \rightarrow 50(1 \text{ d}) \rightarrow 100(1 \text{ d}) \rightarrow 200(1 \text{ d}) \rightarrow 400(1 \text{ d}) \rightarrow 800(1 \text{ d}) \rightarrow 0 \rightarrow 100(60$ $25(1 \text{ d}) \rightarrow 50(1 \text{ d}) \rightarrow 100(1 \text{ d}) \rightarrow 200(1 \text{ d}) \rightarrow 400(1 \text{ d}) \rightarrow 800(1 \text{ d}) \rightarrow 0 \rightarrow 150(60$ $25(1 \text{ d}) \rightarrow 50(1 \text{ d}) \rightarrow 100(1 \text{ d}) \rightarrow 200(1 \text{ d}) \rightarrow 400(1 \text{ d}) \rightarrow 800(1 \text{ d}) \rightarrow 0 \rightarrow 200(60$ $25(1 \text{ d}) \rightarrow 50(1 \text{ d}) \rightarrow 100(1 \text{ d}) \rightarrow 200(1 \text{ d}) \rightarrow 400(1 \text{ d}) \rightarrow 800(1 \text{ d}) \rightarrow 0 \rightarrow 200(60$ $25(1 \text{ d}) \rightarrow 50(1 \text{ d}) \rightarrow 100(1 \text{ d}) \rightarrow 200(1 \text{ d}) \rightarrow 400(1 \text{ d}) \rightarrow 800(1 \text{ d}) \rightarrow 0 \rightarrow 400(60$ |  |  |
|          | 9,10  | $25(1 \text{ d}) \rightarrow 50(1 \text{ d}) \rightarrow 100(1 \text{ d}) \rightarrow 150(1 \text{ d}) \rightarrow 0 \rightarrow 400(60 \text{ min})$  |  |  |
|          | 11,12 | $25(1 \text{ d}) \rightarrow 50(1 \text{ d}) \rightarrow 100(1 \text{ d}) \rightarrow 150(1 \text{ d}) \rightarrow 0 \rightarrow 800(60 \text{ min})$  |  |  |
|          | 13,14 | $25(1 \text{ d}) \rightarrow 50(1 \text{ d}) \rightarrow 100(1 \text{ d}) \rightarrow 200(1 \text{ d}) \rightarrow 400(1 \text{ d}) \rightarrow 800(1 \text{ d}) \rightarrow 0 \rightarrow 50(60 \text{ min})$   |  |  |
|          | 15,16 | $25(1~\text{d}) \rightarrow 50(1~\text{d}) \rightarrow 100(1~\text{d}) \rightarrow 200(1~\text{d}) \rightarrow 400(1~\text{d}) \rightarrow 800(1~\text{d}) \rightarrow 0 \rightarrow 100(60~\text{min})$   |  |  |
| ta El 4t | 17,18 | $25(1 \text{ d}) \rightarrow 50(1 \text{ d}) \rightarrow 100(1 \text{ d}) \rightarrow 200(1 \text{ d}) \rightarrow 400(1 \text{ d}) \rightarrow 800(1 \text{ d}) \rightarrow 0 \rightarrow 150(60 \text{ min})$  |  |  |
| 超固结      | 19,20 | $25(1~{\rm d}) \!$   |  |  |
|          | 21,22 | $25(1~\text{d}) \rightarrow 50(1~\text{d}) \rightarrow 100(1~\text{d}) \rightarrow 200(1~\text{d}) \rightarrow 400(1~\text{d}) \rightarrow 800(1~\text{d}) \rightarrow 0 \rightarrow 400(60~\text{min})$   |  |  |
|          | 23,24 | $25(1 \text{ d}) \rightarrow 50(1 \text{ d}) \rightarrow 100(1 \text{ d}) \rightarrow 200(1 \text{ d}) \rightarrow 400(1 \text{ d}) \rightarrow 800(1 \text{ d}) \rightarrow 0 \rightarrow 800(60 \text{ min})$  |  |  |

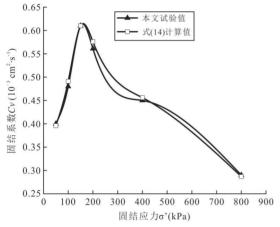


图 3 本文试样正常固结时 $C_v$ - $\sigma$ '关系

Fig. 3  $C_v$ - $\sigma$ ' diagram for normal consolidation of samples in this paper

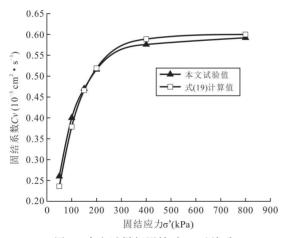


图 4 本文试样超固结时  $C_v$ - $\sigma$ '关系

Fig. 4  $C_v$ -  $\sigma$ ' diagram for over consolidation of samples in this paper

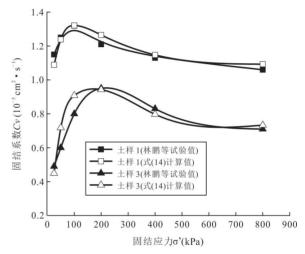


图 5 林鹏等(2003)试样正常固结时  $C_v$ - $\sigma$ '关系 Fig.5  $C_v$ - $\sigma$ ' diagram for normal consolidation of samples by Lin  $et\ al.(2003)$ 

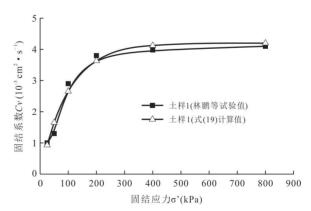


图 6 林鹏等(2003)试样超固结时 $C_v$ - $\sigma$ '关系

Fig. 6  $C_v$ -  $\sigma$ ' diagram for over consolidation of samples by Lin *et al.*(2003)

# 3 Terzaghi一维固结方程的修正

Terzaghi一维固结理论假定固结系数  $C_v$ 为常数,这与实际存在差异,虽说通过传统的 Terzaghi固结方程能够简单快速地进行固结计算,但并不能真正反映土体在固结过程中的性状,其计算值与实际情况差别很大.现根据推导的固结系数拟合公式对传统的 Terzaghi一维固结方程进行修正.传统的 Terzaghi一维固结方程解为:

$$\begin{cases}
U_{t} = 1 - \frac{8}{\pi^{2}} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{m^{2}} \exp\left(-\frac{m^{2}\pi^{2}}{4} T_{v}\right) \\
S_{t} = U_{t} \frac{a_{v}\sigma}{1 + e_{0}} H
\end{cases} (20)$$

Terzaghi理论求解式(20)是一个目前尚无法求和的无穷级数,用该级数解决实际问题时在理论上必定存在截断误差.式(20)为收敛速度很快的级数,在实际工程和研究过程中,取用无穷级数的第一项,即能满足精度要求.将推导的固结系数式(14)和(19)代人式(20),则有修正的Terzaghi一维固结方程解:

$$\begin{cases} U_{t} = 1 - \frac{8}{\pi^{2}} \exp\left(-\frac{m^{2}\pi^{2}}{4} T_{v}^{'}\right) \\ S_{t} = U_{t} \frac{a_{v}\sigma}{1 + e_{0}} H \end{cases}$$
(21)

式(21)中: $U_t$ 为固结度; $T_v$ 为时间因数, $T_v = C_v t/H^2$ ,t为固结时间,H为最大排水距离; $S_t$ 为沉降; $\sigma$ 为固结应力;修正的 Terzaghi 一维固结方程同时考虑了土体应力历史和前期固结压力的影响,将固结系数 $C_v$ 视为应力水平的变量,弥补了传统的 Terzaghi一维固结方程 $C_v$ 恒定的不足.因此,修正的 Terzaghi一维固结方程更加真实的反映土体固结性状.

## 4 工程应用分析

假设公路路基采用上述试验的饱和软土,6 m 厚, $C_{v0}$ =0.6×10<sup>-3</sup> cm<sup>2</sup>s<sup>-1</sup>,先期固结应力 $p_c$ 为150 kPa.采用堆载压实固结法,假定上覆均布荷载为50、100、200以及400 kPa,如图7所示,探究修正前后的Terzaghi一维固结方程计算的路基固结度和沉降的异同.

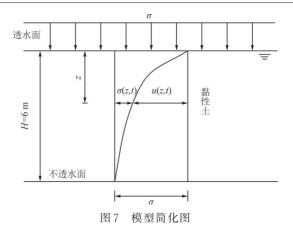
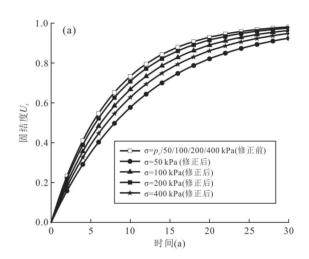


Fig.7 Simplified diagram of model



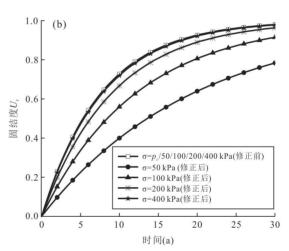
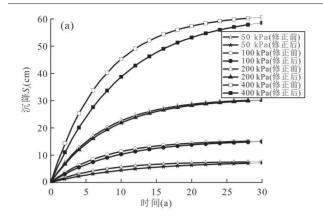


图8 不同荷载下固结度与时间关系曲线

Fig.8 Relationships between degree of consolidation and time under different loadings
a. 正常固结:b.超固结

图 8 为不同荷载下利用式(20)和(21)计算的  $U_t$ -t 关系曲线.可见,在固结开始时,修正前后的 Terzaghi一维固结方程计算的初始固结度  $U_{t=0}$ 均为



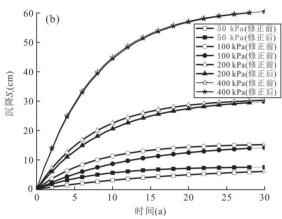


图 9 不同荷载下沉降与时间关系曲线

Fig.9 Relationship between settlement and time under different loadings

a. 正常固结;b. 超固结

0,随着固结的进行,固结度逐渐增大,并最终趋于稳 定U=1,但修正前的固结稳定所需时间明显小于 修正后的固结稳定所需时间,因为修正的Terzaghi 一维固结方程考虑了上覆荷载对孔隙比和渗透系 数的影响,固结过程中土体的渗透性逐渐降低.传 统的 Terzaghi 一维固结理论假定固结系数为常数, 所以按传统的 Terzaghi 一维固结方程预测的固结度 与荷载无关,即上覆荷载为 $\sigma = p_c$ ,50,100,200和 400 kPa 对应的  $U_t$  -t 关系曲线相同,显然与很多实 际工程不符;从图8可知,上覆荷载越接近 $P_c$ ,单位 时间增量对应的固结度越大,且荷载越接近 $P_c$ ,固 结稳定所需时间越短,如固结度U,达到0.95时,正 常固结状态的地基上覆荷载为 $\sigma$ =50,100,200和 400 kPa 时对应所需时间分别为 t=34.8,27.2,24.36 和30.38 a, 因为固结系数受应力历史的影响, 在前 期固结压力附近有较大变化.对比正常固结和超固 结状态的软土地基,超固结状态的软土地基固结时 间要大于正常固结状态的软土地基.

图 9 为不同荷载下修正前后的 Terzaghi 一维固结方程计算的  $S_{\iota}$ -t关系曲线,固结初期,初始沉降  $S_{\iota}$ =0,随着固结的进行,沉降  $S_{\iota}$ 逐渐增大,并最终趋于稳定值  $a_{\iota}\sigma H/(1+e_{\iota})$ ,且按传统的 Terzaghi 一维固结方程预测的沉降稳定所需时间小于式(21)预测的沉降稳定所需时间.最终沉降随上覆荷载增大而增大,荷载为 $\sigma$ =50,100,200 和 400 kPa 对应的最终沉降分别为 7.73,15.5,30.9 和 61.8 cm. 当上覆荷载较小时,修正前后的  $S_{\iota}$ -t关系曲线较吻合,尤其越接近  $P_{\iota}$ 时,吻合效果越好.但当上覆荷载较大时,修正前后的  $S_{\iota}$ -t关系曲线相差较明显.除此之外,荷载越大,沉降趋于稳定所需时间越长.

### 5 结论

(1)应力历史对饱和软土固结系数的影响是不容忽视的,对于正常固结状态的软土,当 OCR>1时,固结系数随固结应力的增大而逐渐增大;当 OCR<1时则相反.对于超固结状态,固结系数随固结应力的增大而逐渐增大,增长幅度逐渐减小,最后趋于平缓.

(2)考虑应力历史影响的固结系数计算值与试验结果的变化规律一致,数值接近.其优势在于只需测定土体在σ=p<sub>ε</sub>时的物理参数(孔隙比、渗透系数、压缩指数和回弹指数),即可预估软土在固结程中的固结系数变化规律,比未考虑应力历史影响更接近于实际情况.

(3)修正的 Terzaghi 一维固结方程同时考虑了 土体前期的应力历史和后期的应力水平对固结系 数的影响,能够准确的反映土体固结真实性状,在 工程中能够准确计算地基固结度及沉降.

#### References

Chen, B., Sun, D.A., Lü, H.B., 2013. Experimental Study of Compression Behavior of Marine Soft Clays. *Rock and Soil Mechanics*, 34(2):381—388(in Chinese with English abstract).

Gao, J., Dang, F.N., Ding, J.L., et al., 2019. Research on Soft Soil Consolidation Calculation Method Considering the Impacts of Initial Consolidation State. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 38(Suppl. 1): 3189—3196(in Chinese with English abstract).

GB/T 50123—2019, 2019. Standard for Soil Test Method. China Planning Press, Beijing, 74—80(in Chinese).

Ge, Q., Liang, X., Gong, X.L., et al., 2017. Application and

- Comparison of Various Methods for Determining Hydraulic Conductivity in Saturated Clay-Rich Deposits: A Case Study of Clay-Rich Sediments in North Jiangsu Coastal Plain. *Earth Science*, 42(5):793—803 (in Chinese with English abstract).
- Gui, Y., Yu, Z.H., Liu, H.M., et al., 2016. Experimental Study of the Change Law of Consolidation Coefficient of the Plateau Lacustrine Peaty Soil. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 35(Suppl. 1): 3259—3267(in Chinese with English abstract).
- Jia, R., Lei, H. Y., 2019. Experimental Study of Anisotropic Consolidation Behavior of Ariake Clay. Rock and Soil Mechanics, 40(6): 2231-2238(in Chinese with English abstract).
- Lei, H.Y., Feng S.X., Jiang, Y., 2018. Geotechnical Characteristics and Consolidation Properties of Tianjin Marine Clay. *Geomechanics and Engineering*, 16(2): 125—140. https://doi.org/10.12989/gae.2018.16.2.125
- Lin, P., Xu, Z.H., Xu, P., et al., 2003. Research on Coefficient of Consolidation of Soft Clay under Compression. *Rock and Soil Mechanics*, 24(1): 106—108, 112(in Chinese with English abstract).
- Lü, W.Q., Dong, Z.L., Chen, P.S., et al., 2009. Research on Relationship between Permeability Coefficient and Consolidation Stress of Normal Consolidation Clay. *Rock* and Soil Mechanics, 30(3): 769-773(in Chinese with English abstract).
- Meng, G.T., Wang, S.H., Zhang, D.B., et al., 2001. Determination of Consolidation Coefficient by Piezo-Cone Penetration Test. *Earth Science*, 26(1): 93—98(in Chinese with English abstract).
- Mesri, G., Ajlouni, M., 2007. Engineering Properties of Fibrous Peats. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 133(7): 850—866. https://doi.org/10.1061/(asce)1090-0241(2007)133:7(850)
- Singhl, S. K., 2005. Estimating Consolidation Coefficient and Final Settlement: Triangular Excess Pore Water Pressure. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 131(8): 1050—1055. https://doi.org/10.1061/(asce)1090-0241(2005)131:8(1050)
- Singhl, S.K., 2008. Identifying Consolidation Coefficient: Linear Excess Pore-Water Pressure. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 134(8):1205—1209. https://doi.org/10.1061/(asce)1090-0241(2008)134:8 (1205)
- Terzaghi, K., 1943. Theoretical Soil Mechanic. John Wiley and Sons Inc., New York, 265—296.
- Wu, X.T., 2013. Research on Relation between Consolidation

- Coefficient and Consolidation Stress of Silt in Wenzhou Shoal. *Rock and Soil Mechanics*, 34(6): 1675—1680(in Chinese with English abstract).
- Yu, C., Liu, S.Y., 2004. Calculation and Experiment on Consolidation Coefficient for Soft Clay Considering Different Stress Levels. *Rock and Soil Mechanics*, 25(Suppl. 2): 103-107(in Chinese with English abstract).
- Zhang, W. M., Gu, X. W., Wang, F., et al., 2015. Swelling Tests on Soils and Simulation Method for Unloading Swelling Process. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 37(6): 979—987(in Chinese with English abstract)
- Zhang, W. M., Gu, X. W., Wang, F., 2016. Back Analysis of Terzaghi Consolidation Coefficient. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 38(Suppl. 1): 99—103(in Chinese with English abstract).
- Zhang, Y.P., Yu, Y.N., Zhang, T.Q., et al., 2002. A Method for Evaluating Coefficient of Consolidation. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 24(5):616—618(in Chinese with English abstract).
- Zhu, G.F., Yin, J.H., 2005. Consolidation of a Soil Layer Subsequent to Cessation of Deposition. *Canadian Geotechni*cal Journal, 42(2): 678—682. https://doi.org/10.1139/ t04-105

#### 附中文参考文献

- 陈波,孙德安,吕海波,2013.海相软土压缩特性的试验研究. 岩土力学,34(2):381-388.
- 高俊,党发宁,丁九龙,等,2019.考虑初始固结状态影响的软基固结计算方法研究.岩石力学与工程学报,38(增刊1):3189-3196.
- GB/T 50123-2019,2019. 土工试验方法标准. 北京:中国计划出版社,74-80.
- 葛勤,梁杏,龚绪龙,等,2017.不同饱和黏性土渗透系数预测方法的应用与对比:以苏北沿海平原黏土为例.地球科学,42(5):793-803.
- 桂跃,余志华,刘海明,等,2016.高原湖相泥炭土固结系数变 化规律试验研究.岩石力学与工程学报,35(增刊1): 3259-3267.
- 加瑞,雷华阳,2019.有明黏土各向异性固结特性的试验研究.岩土力学,40(6):2231-2238.
- 林鹏,许镇鸿,徐鹏,等,2003. 软土压缩过程中固结系数的研究. 岩土力学,24(1):106-108,112.
- 吕卫清,董志良,陈平山,等,2009.正常固结软土渗透系数与固结应力关系研究.岩土力学,30(3):769-773.
- 孟高头,王四海,张德波,等,2001.用孔压静力触探求固结系数的研究.地球科学,26(1):93-98.
- 吴雪婷,2013.温州浅滩淤泥固结系数与固结应力关系研究.

岩土力学,34(6):1675-1680.

- 余闯,刘松玉,2004.考虑应力水平的软土固结系数计算与试验研究.岩土力学,25(增刊2):103-107.
- 章为民,顾行文,王芳,等,2015.土的卸荷回弹试验及其时间过程的计算方法.岩土工程学报,37(6):979-987.
- 章为民,顾行文,王芳,2016.Terzaghi固结系数的试验反演分析.岩土工程学报,38(增刊1):99-103.
- 张仪萍, 俞亚南, 张土乔, 等, 2002. 室内固结系数的一种推算方法. 岩土工程学报, 24(5):616-618.

\*

# 《地球科学》

# 2021年1月 第46卷 第1期 要目预告

| 基于深度学习的地质找矿大数据挖掘与集成的挑战 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·          | 左仁 | 广等 |
|---|----|----|
| 末次冰期以来巽他陆架东北部陆坡区正构烷烃分布特征及其古植被意义 · · · · · · · · · · · · · · · · · · · | 崔子 | 恒等 |
| 三峡水库运行前后洞庭湖水资源量变化 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·               | 贺秋 | 华等 |
| 歧口凹陷热液流体活动及其对储集层的改造   | 侯中 | 帅等 |
| 基于随机森林的滑坡空间易发性评价一以三峡库区湖北段为例・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・       | 吴润 | 泽等 |
| 鄂西早三叠世南漳一远安动物群地层分布特征 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·            | 阎春 | 波等 |
| 花东海盆综合地震探测及其重要的构造意义 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·             | 赵明 | 辉等 |
| 差分法计算地震动旋转分量 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·                    | 李栋 | 青等 |
| 伊拉克 M油田白垩系 Mishrif组潟湖环境碳酸盐岩储集层成因机理······                              | 李峰 | 峰等 |
| 湖南锡田钨锡多金属矿田燕山期 NE 向断层演化历史及其成矿意义·····                                  | 刘  | 飚等 |