

# 一种修正的软土次固结计算公式

徐楠<sup>1,2</sup>, 吴跃东<sup>1,2</sup>

(1. 河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210098;  
2. 江苏省岩土工程技术工程研究中心, 江苏 南京 210098)

**摘要:**通过室内压缩试验研究了软土次固结系数与压力的关系,结果表明可以分别用幂函数和双曲线函数拟合超固结土和正常固结土的次固结系数-压力关系曲线。在试验研究的基础上,考虑压力大小影响和计算收敛特征,对常规次固结计算公式进行修正,提出了一种次固结计算修正公式。工程实例计算结果表明,修正公式能更好地反映软土的次固结特性,具有一定的工程应用价值。

**关键词:**软土;次固结系数;固结压力;工后沉降;压缩试验

**中图分类号:**TU470<sup>+</sup>.3      **文献标志码:**A      **文章编号:**1006-7647(2018)03-0066-04

**A modified formula of soft soil secondary consolidation** //XU Nan<sup>1,2</sup>, WU Yuedong<sup>1,2</sup> (1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Jiangsu Research Center for Geotechnical Engineering Technology, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** The relationship between the secondary consolidation coefficient and pressure for soft soil is studied by indoor compression test. It is found that the secondary consolidation coefficient-pressure curve of over-consolidated soil and normal consolidated soil can be fitted by a power function and a hyperbola function, respectively. Based on the experiment, the conventional secondary consolidation formula was corrected and a modified one was proposed considering the effect of pressure and the convergence characteristic of calculation. The results of its application to an engineering project show that the new formula can better reflect the secondary consolidation characteristic of soft soil, indicating great engineering value.

**Key words:** soft soil; secondary consolidation coefficient; consolidation pressure; post-construction settlement; compression test

软土是第四纪后期沉积物,在我国分布十分广泛,从沿海到内陆,从平原到山区都有较大范围分布。软土具有孔隙比大、含水率高、渗透系数小、压缩性高等工程特性,另一方面,软土还存在很强的流变性质,软土地基在主固结结束后仍然存在一个明显的次固结过程。

许多学者都对软土的次固结特性进行了研究。Taylor等<sup>[1]</sup>认为土体的次固结与土颗粒间的摩擦力有关,摩擦力在土体压缩过程中的延滞导致了次固结的发生。Kuhn等<sup>[2]</sup>认为土体的次固结过程是体应变和剪应变随时间而变化的结果,并且还认为这种变化的快慢与土体结构间的黏滞阻力有关。孙明乾等<sup>[3]</sup>认为土体的次固结是结合水在土颗粒间发生变化迁移,导致结合水膜的厚度发生改变,进而使土颗粒产生相对位移的过程。Zhu等<sup>[4]</sup>考虑正常固结土与超固结土的差别,构建了一种土体一维流变

模型。冯志刚等<sup>[5]</sup>探讨了次固结系数与加荷比之间的联系,认为当加荷比为常数时,随着压力的加大,次固结系数呈现出先增后减的发展趋势,并且存在一个明显的极值。陈志波等<sup>[6]</sup>对福州地区软土进行了一系列的固结试验,认为次固结系数不仅与超固结比有关,而且与超压历时有关。雷华阳等<sup>[7-9]</sup>研究表明次固结系数与压缩指数具有良好的线性相关性,且随时间的增加均呈对数下降趋势。余湘娟等<sup>[10-12]</sup>发现次固结应变与时间的关系曲线符合双曲线函数的特征,于是在分析次固结系数影响因素的基础上,推导出了一种考虑固结压力影响的次固结计算公式。Xie等<sup>[13]</sup>还研究了次固结与排水速度、加荷类型的关系。

目前的沉降计算方法要么没有考虑次固结沉降,要么简单地在主固结沉降的基础上乘一个放大系数。放大系数的取值有很大的变化空间,这种随意性导致沉降预测与实际沉降相差很大。为此本文

通过室内压缩试验,对软土次固结系数与压力的关系进行研究,并考虑计算收敛特征,对常规次固结计算公式进行了修正。

1 次固结影响因素试验

试验土样取自温州龙湾至洞头疏港公路工程 K19+200 处,取样深度 4.1 ~ 4.6 m,按照 SL237—1999《土工试验规程》的要求测定土样的相关物理性质参数,得到试样基本物理力学参数如下:湿密度 1.76 g/cm<sup>3</sup>、含水率 53.8%、孔隙比 1.440、黏聚力 15 kPa、内摩擦角 3°、前期固结压力 200 kPa。

采用单杠杆固结仪进行室内压缩试验。所加荷载的变化范围为 25 ~ 1 600 kPa,加荷比恒定为 1,每一级荷载的持荷时间均为 24 h。在每级荷载作用下,分别经过 6 s、15 s、1 min、2.25 min、4 min、6.25 min、9 min、16 min、20.25 min、25 min、30.25 min、36 min、42.25 min、49 min、64 min、100 min、225 min、400 min、12 h 和 24 h 读数,作出土样的孔隙比-时间半对数 ( $e-\lg t$ ) 曲线,可以得出土样的次固结系数。以试样所受的压力  $p$  为横坐标,与之对应的次固结系数  $C_\alpha$  为纵坐标,作出次固结系数与压力的关系如图 1 所示。从图 1 可以清晰地看出,压力较小时,随着荷载的增大,次固结系数增长较快,随后荷载再增加,次固结系数反而变小,在压力接近前期固结压力 200 kPa 时达到极值。

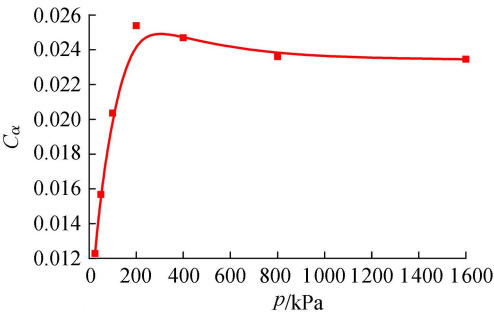


图 1 土样  $C_\alpha$ - $p$  关系曲线

仿照超固结比的定义,定义荷载作用比  $u$  为土体当前承受的总压力与前期固结压力的比值,并作出  $C_\alpha$ - $u$  关系曲线如图 2 所示。从图 2 可以看出,在

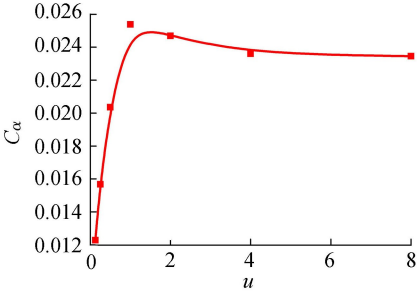


图 2 土样  $C_\alpha$ - $u$  关系曲线

$u=1$  的两侧,曲线呈现两种完全不同的变化关系。当  $u \leq 1$  时,曲线较陡,增长较快;当  $u > 1$  时,曲线呈下降趋势,但是这种趋势越来越缓,明显地向某一直线趋近。鉴于上述变化特点,考虑分别用幂函数和双曲线函数来对曲线进行拟合。

a.  $u \leq 1$  时的曲线拟合。如图 3 所示,当  $u \leq 1$  时,做出次固结系数与荷载作用比的散点图,并用幂函数进行拟合,得到的公式为

$$C_\alpha = 0.025\,52u^{0.347\,95} \quad (R^2 = 0.998) \quad (1)$$

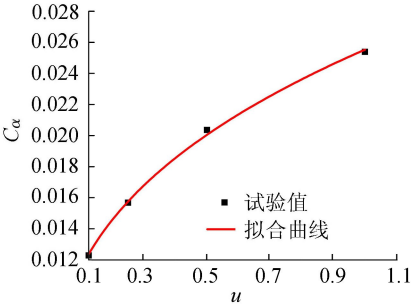


图 3 土体  $C_\alpha$ - $u$  关系曲线 ( $u \leq 1$ )

b.  $u > 1$  时的曲线拟合。用双曲线函数来拟合试验数据时,所用的双曲线方程为

$$C_\alpha = \eta + \frac{\lambda}{u} \quad (2)$$

即

$$uC_\alpha = \eta u + \lambda \quad (3)$$

式中  $\eta$ 、 $\lambda$  为待定的参数。由式(3)可知,求  $\eta$ 、 $\lambda$  即求拟合直线的斜率和截距, $uC_\alpha$ - $u$  的关系曲线如图 4 所示,得到的函数表达式为

$$C_\alpha = 0.009\,2 + \frac{0.002\,1}{u} \quad (R^2 = 0.999) \quad (4)$$

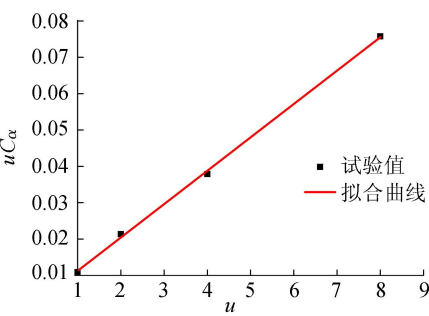


图 4 土体  $uC_\alpha$ - $u$  关系曲线 ( $u > 1$ )

分析上述拟合公式可以发现,在荷载作用下,压力不断加大,土体被压缩的越来越紧密,因此加载同样的时间后,变形越来越小,这一性质在次固结阶段的表现即为次固结沉降和次固结系数都越来越小。这也与土体的压缩固结特性吻合。

2 次固结计算公式修正

目前,在实际工程中计算次固结变形的常规公式为 Buisman 公式:

$$S_s = \frac{H}{1 + e_0} C_\alpha \lg(t_2/t_1) \quad (5)$$

式中:  $S_s$  为次固结沉降;  $H$  为压缩土层厚度;  $e_0$  为初始孔隙比;  $t_1$  为主固结完成也即次固结开始的时间;  $t_2$  为固结时间。

Buisman 公式概念清晰, 计算简洁, 因而应用广泛。但该公式存在一定的缺陷, 即当  $t_2$  趋近于无穷大时, 次固结变形  $S_s$  也趋近于无穷大, 这显然是不符合事实的。此外, 很多的试验研究发现, 次固结变形与土体的荷载状况、应力历史甚至加荷比均有关系<sup>[14-16]</sup>, 但 Buisman 公式中唯一的与次固结有关的参数  $C_\alpha$  在实际计算中是取一个常数, 完全忽略了这些因素的影响。基于此, 考虑既满足收敛性的要求, 又能体现次固结的影响, 以 Buisman 公式为基础, 基于软土次固结最终有一个极限值, 采用双曲线函数对次固结计算公式修正如下:

$$S_s = \frac{H}{1 + e_0} C_\alpha \left[ A + \frac{B}{\lg(t_2/t_1)} \right] \quad (6)$$

式中  $A$ 、 $B$  为待定的参数。

考虑到软土的固结是由于孔隙水的排除, 土颗粒本身不可压缩, 因而土体变形最终应该收敛于  $\frac{He_0}{1+e_0}$ , 基于此, 在  $t_2 \rightarrow +\infty$  的条件下求式(6)的极值。

当  $t_2 \rightarrow +\infty$  时,  $\lg(t_2/t_1) \rightarrow +\infty$ , 因而  $\frac{B}{\lg(t_2/t_1)} \rightarrow 0$ , 因为  $S_s$  最终的极值是  $\frac{He_0}{1+e_0}$ , 所以  $A$  的值为  $\frac{e_0}{C_\alpha}$ ; 对于  $B$

的取值, 在  $t_2 \rightarrow +\infty$  时,  $B$  取任意常数,  $\frac{B}{\lg(t_2/t_1)} \rightarrow 0$ , 所以  $B$  最终取为最简单的“1”。将  $A$ 、 $B$  的取值代入式(6)得:

$$S_s = \frac{H}{1 + e_0} C_\alpha \left[ \frac{e_0}{C_\alpha} + \frac{1}{\lg(t_2/t_1)} \right] \quad (7)$$

式中次固结系数  $C_\alpha$  根据式(1)和式(4)表示为

$$C_\alpha = \begin{cases} \alpha u^\beta & u \leq 1 \\ \eta + \frac{\lambda}{u} & u > 1 \end{cases} \quad (8)$$

式中  $\alpha$ 、 $\beta$  为待定的参数。

### 3 实例验证

温州龙湾至洞头疏港公路工程是浙江 77 省道延伸线的一部分, 工程起点为龙湾上岙, 终点为洞头本岛的小朴码头。以龙湾至洞头疏港公路工程 K19+200 断面沉降为例, 来验证修正公式计算次固结沉降的适用性和准确性。运用图解法对沉降-时间半对数曲线进行分析, 曲线反弯点处对应的时间为 441 d, 即次固结的开始时间是 441 d。

修正公式计算用到的参数取值为:  $u = 0.4$ ,  $\alpha = 0.0182$ ,  $\beta = 0.3550$ ; 由式(8)计算得  $C_\alpha = 0.0131$ , 计算结果如表 1 所示。从表 1 可以看出, 在次固结前期, 常规公式和修正公式计算的沉降值接近, 而在次固结后期, 与实测值相比, 常规公式偏于保守, 而修正公式计算值更接近实测值。

表 1 次固结沉降量计算值和实测值对比

| $t/d$ | 沉降量/mm |         |         |
|-------|--------|---------|---------|
|       | 实测值    | 常规公式计算值 | 修正公式计算值 |
| 441   | 0      | 0       | 0       |
| 476   | 2.98   | 3.23    | 3.94    |
| 497   | 6.73   | 7.04    | 7.37    |
| 518   | 12.64  | 13.49   | 13.71   |
| 600   | 31.30  | 25.43   | 35.89   |
| 700   | 44.79  | 35.45   | 48.35   |
| 800   | 50.65  | 39.21   | 59.34   |
| 1500  |        | 90.43   | 110.22  |
| 3000  |        | 142.53  | 165.88  |

### 4 结 论

a. 定义土体为荷载作用比  $u$  为当前所承受的总压力与前期固结压力的比值, 并且认为次固结系数与压力的关系本质上可以归结为次固结系数与荷载作用比的关系。试验结果表明次固结系数在  $u \leq 1$  和  $u > 1$  时呈两种不同的变化规律,  $u \leq 1$  时满足幂函数表达式,  $u > 1$  时满足双曲线的变化规律。

b. 提出的次固结计算修正公式能够克服常规次固结计算公式不收敛的缺点, 且能够考虑压力大小对次固结的影响, 公式简洁, 概念清晰。工程实例计算结果表明, 修正公式能更好地反映软土的次固结特性, 具有一定的工程应用价值。

### 参考文献:

[1] TAYLOR D W, MERCHANT W. A Theory of clay consolidation accounting for secondary compression[J]. Studies in Applied Mathematics, 1940, 19(1/2/3/4): 167-185.

[2] KUHN M R, MITCHELL J K. New perspectives on soil creep[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1993, 119(3): 507-524.

[3] 孙明乾, 王清, 牛岑岑, 等. 考虑次固结效应的流变固结理论研究[J]. 工程地质学报, 2015, 23(4): 675-680. (SUN Mingqian, WANG Qing, NIU Cencen, et al. Rheological consolidation theory of soft soils with secondary consolidation effect[J]. Journal of Engineering Geology, 2015, 23(4): 675-680. (in Chinese))

[4] ZHU G, YIN J H. Elastic visco-plastic consolidation modelling of clay foundation at Berthierville test embankment[J]. International Journal for Numerical & Analytical Methods in Geomechanics, 2000, 24(5): 491-

508.

[ 5 ]

冯志刚,朱俊高. 软土次固结变形特性试验研究[J]. 水利学报,2009,40(5):583-588. ( FENG Zhigang, ZHU Jungao. Experimental study on secondary consolidation behavior of soft soils [ J ]. Journal of Hydraulic Engineering,2009,40(5):583-588. ( in Chinese ) )

[ 6 ]

陈志波,孔秋平. 福州软土次固结变形特性试验研究[J]. 中南大学学报(自然科学版),2014,45(10):3602-3607. ( CHEN Zhibo, KONG Qiuping. Experimental study on secondary consolidation properties of Fuzhou soft soils [ J ]. Journal of Central South University ( Science and Technology ),2014,45(10):3602-3607. ( in Chinese ) )

[ 7 ]

雷华阳,张文振,丁小冬,等. 考虑软土结构强度的次固结特性试验研究[J]. 岩土工程学报,2013,35(7):1221-1227. ( LEI Huayang, ZHANG Wenzhen, DING Xiaodong, et al. Experimental study on secondary consolidation characteristics considering structural strength of soft soil [ J ]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2013,35(7):1221-1227. ( in Chinese ) )

[ 8 ]

雷华阳,陈丽,丁小冬,等. 两种类型吹填场区地基土的次固结特性试验研究[J]. 岩土工程学报,2013,35(增刊1):90-96. ( LEI Huayang, CHEN Li, DING Xiaodong, et al. Properties of secondary consolidation of two types of dredger fill sites [ J ]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2013,35(Sup1):90-96. ( in Chinese ) )

[ 9 ]

雷华阳,李宾,仇王维,等. 吹填场区软黏土地基的次固结特性研究[J]. 岩土力学,2015,36(增刊1):120-124. ( LEI Huayang, LI Bin, QIU Wangwei, et al. Secondary consolidation characteristics of soft clay foundation of dredger fill site [ J ]. Rock and Soil Mechanics,2015,36(Sup1):120-124. ( in Chinese ) )

[ 10 ]

余湘娟,殷宗泽,董卫军. 荷载对软土次固结影响的试验研究[J]. 岩土工程学报,2007,29(6):913-916. ( YU Xiangjuan, YIN Zongze, DONG Weijun. Influence of load on secondary consolidation deformation of soft soils [ J ]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2007,29(6):913-916. ( in Chinese ) )

[ 11 ]

余湘娟,董卫军,殷宗泽. 软土次固结系数与压力的关系[J]. 河海大学学报(自然科学版),2008,36(1):63-66. ( YU Xiangjuan, DONG Weijun, YIN Zongze. Relationship between loads and secondary consolidation coefficients of soft clay soils [ J ]. Journal of Hohai University ( Natural Sciences ),2008,36(1):63-66. ( in Chinese ) )

[ 12 ]

余湘娟,殷宗泽,高磊. 软土的一维次固结双曲线流变模型研究[J]. 岩土力学,2015,36(2):320-324. ( YU Xiangjuan, YIN Zongze, GAO Lei. A hyperbolic rheological model for one-dimensional secondary consolidation of soft soils [ J ]. Rock and Soil Mechanics,2015,36(2):320-324. ( in Chinese ) )

[ 13 ]

XIE K H, HUANG D Z, WANG Y L, et al. Analytical theory for one-dimensional consolidation of soil induced by time-dependent pumping and loading [ J ]. Marine Georesources & Geotechnology, 2014, 32(4):328-350.

[ 14 ]

曹玉苹. 论饱和黏性土次固结系数与含水量的关系[J]. 中国港湾建设,2007,6(3):21-23. ( CAO Yuping. Relationship of coefficients of secondary consolidation with moisture content of saturated cohesive soil [ J ]. China Harbour Engineering,2007,6(3):21-23. ( in Chinese ) )

[ 15 ]

周秋娟,陈晓平. 软土次固结特性试验研究[J]. 岩土力学,2006,27(3):404-408. ( ZHOU Qiujuan, CHEN Xiaoping. Test study on properties of secondary consolidation of soft soil [ J ]. Rock and Soil Mechanics,2006,27(3):404-408. ( in Chinese ) )

[ 16 ]

盛维高,李国维,刘汉龙,等. 超载预压软土的次压缩沉降估算方法[J]. 河海大学学报(自然科学版),2009,37(5):596-601. ( SHENG Weigao, LI Guowei, LIU Hanlong. Estimation method of secondary compression settlement for soft soil under surcharge preloading [ J ]. Journal of Hohai University ( Natural Sciences ),2009,37(5):596-601. ( in Chinese ) )

( 收稿日期:2017-06-20 编辑:熊水斌 )

+++++

• 简讯 •

水电工程垂直升船机技术研讨会暨  
技术交流会在景洪召开

为促进行业科技进步,推动技术创新,中国水力发电工程学会水工金属结构专业委员会于2018年4月2—4日在云南省景洪市召开了水电工程垂直升船机技术研讨会暨技术交流会。会议由华能澜沧江水电股份有限公司和中国电建集团昆明勘测设计研究院有限公司共同承办。会议主要围绕水电工程垂直升船机的建设开展技术交流和研讨,中国工程院院士马洪琪出席会议并做了“水力式升船机关键技术及应用”的专题报告,另有十余位代表在会上做了学术交流报告。

垂直升船机是水电工程中船舶快速过坝的通航设施,是一种重要的通航建筑物。我国升船机建设在世界高坝通航领域具有举足轻重的地位。目前,国内已建成并投运的主要升船机有3种:以景洪水电站升船机为代表的水力式升船机;以三峡水利枢纽升船机为代表的齿轮齿条爬升式升船机;以福建水口水电站和贵州思林水电站等升船机为代表的钢丝绳卷扬提升式升船机。会议重点探讨了景洪水力式升船机的研究成果。景洪水力式升船机是马洪琪院士带领行业专家团队,历时近15年的探索和研究,成功建成的世界首座水力式升船机,其在应对下游水位大幅快速变化和船厢漏水等方面具有明显的优势。

本次会议对推动我国升船机技术创新和行业科技进步,进一步奠定我国升船机建设技术的国际领先地位将产生积极作用。

( 本刊编辑部供稿 )

水利水电科技进展,2018,38(3) Tel:025-83786335 E-mail:jz@hhu.edu.cn http://www.hehaiqikan.cn

• 69 •