

超载预压处理软土的次固结特征及沉降计算

陈立国, 吴昊天, 陈晓斌, 贺建清

Secondary consolidation characteristics and settlement calculation of soft soil treated by overload preloading

CHEN Ligu, WU Haotian, CHEN Xiaobin, and HE Jianqing

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202009016>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

各向异性对软土力学特性影响的离散元模拟

Discrete element simulation of the influence of anisotropy on the mechanical properties of soft soil

赵洲, 宋晶, 刘锐鸿, 杨守颖, 李志杰 水文地质工程地质. 2021, 48(2): 70-77

加热对软土地基真空预压排水固结的影响研究

§{suggestArticle.titleEn}

王天园, 邓岳保, 毛伟, 刘铨 水文地质工程地质. 2020, 47(1): 62-68

高岭土电渗固结特性及数值模拟研究

A study of the kaolin electro-osmotic consolidation characteristics and their numerical simulation

沈美兰, 周太全, 李吴刚 水文地质工程地质. 2021, 48(4): 78-85

侵蚀环境中碱渣-矿渣固化淤泥的力学性质

Mechanical properties of the soft soil stabilized with soda residue and ground granulated blast furnace slag under the erosion environment

何俊, 栗志翔, 石小康, 王小琦 水文地质工程地质. 2019, 46(6): 83-89

固结与荷载耦合作用下吹填土力学性质与微结构参数关联性

Correlation between mechanical properties and microstructure parameters of soft dredger fill under the coupling action of consolidation and load

杨爱武, 封安坤, 姜帅, 仲涛, 李潇雯 水文地质工程地质. 2019, 46(5): 96-105

颗粒级配与孔隙比对粗粒土渗透系数的影响

Effects of gradation and void ratio on the coefficient of permeability of coarse-grained soil

丁瑜, 饶云康, 倪强, 许文年, 刘大翔, 张恒 水文地质工程地质. 2019, 46(3): 108-108



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202009016

超载预压处理软土的次固结特征及沉降计算

陈立国^{1,2}, 吴昊天³, 陈晓斌¹, 贺建清³

(1. 中南大学土木建筑学院, 湖南长沙 410075; 2. 湖南省水利水电勘测设计研究总院, 湖南长沙 410007; 3. 湖南科技大学岩土工程稳定控制与健康监测省重点实验室, 湖南湘潭 411201)

摘要: 为了研究超载预压软土的次固结特征, 分析超载预压处理软土地基的工后沉降, 文章考虑应力历史对软土结构性的影响, 模拟现场工况, 对重塑洞庭湖软土试样进行超载预压后再压缩的一维固结蠕变试验。研究表明: 经过超载预压的软土卸荷后再进行加载, 压缩变形过程中主固结时间明显缩短, 约为未经超载预压处理软土主固结时间的 1/3, 打设排水竖井对软土主固结时间几乎没影响; 预压荷载越大, 次固结系数越小, 超载预压有利于消除软土的次固结沉降; 随着建(构)筑物荷载的增加, 次固结系数增大; 打设排水竖井, 未经预压处理软土的次固结系数略有增加, 经过超载预压处理软土的次固结系数略有减小, 但影响效果不是很明显。考虑应力历史, 引入超载增量比, 发现次固结系数与超载增量比呈线性递减关系, 建立了相应的计算模型, 提出了次固结沉降计算公式。试验及分析结果对预压处理地基的设计和施工具有一定的指导意义。

关键词: 超载预压; 软土; 次固结系数; 排水竖井; 超载增量比; 沉降

中图分类号: TU411

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2021)01-0138-08

Secondary consolidation characteristics and settlement calculation of soft soil treated by overload preloading

CHEN Ligu^{1,2}, WU Haotian³, CHEN Xiaobin¹, HE Jianqing³

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Central South University, Changsha, Hunan 410075, China; 2. Hunan Hydro & Power Design Institute, Changsha, Hunan 410007, China; 3. Hunan Provincial Key Laboratory of Geotechnical Engineering for Stability Control and Health Monitoring, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan, Hunan 411201, China)

Abstract: In order to examine the secondary consolidation characteristics of the soft soil treated with overloading preloading and analyze the post-construction settlement of the soft soil foundation treated with overloading preloading, the soft soil of the Dongting Lake is remolded considering the influence of stress history on the structure of the soft soil. In the test, the field conditions are simulated, and the one-dimensional consolidation creep test of soft soil remolded samples is conducted after surcharge preloading and recompression. The results show that the main consolidation time of soft soil after unloading and loading after preloading is significantly shortened, which is about 1/3 that of soft soil without surcharge preloading, and the main consolidation time of soft soil is almost not affected by the construction of drainage shaft. Moreover, the higher the preloading, the smaller the secondary consolidation coefficient is, and the overloading preloading is helpful in eliminating the secondary consolidation settlement of soft soil. The secondary consolidation coefficient increases with the increasing building load. Furthermore, the secondary consolidation coefficient of soft soil without preloading increases slightly when the drainage shaft is set up, and that of soft soil after overload preloading decreases

收稿日期: 2020-09-10; 修订日期: 2020-10-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51978674); 湖南省教育厅资助项目(18A189)

第一作者: 陈立国(1977-), 男, 在职博士研究生, 教授级高级工程师, 主要从事公路、市政工程建设管理工作。E-mail: 57382091@qq.com

slightly, but the effect is not obvious. Considering the stress history and introducing the overload increment ratio, the relationship between the secondary consolidation coefficient and the overload increment ratio is found to be linearly decreasing. The corresponding calculation model is established, and the calculation formula of the secondary consolidation settlement is put forward. The results of the tests and analyses are of some guiding significance for the design and construction of precompression foundation.

Keywords: overload preloading; soft soil; secondary consolidation coefficient; drainage shaft; overload increment ratio; settlement

在未经处理的软土地基上修建建(构)筑物,经常会出现严重的工后沉降问题。采用竖井径向排水配合超载预压处理软土地基是目前工程实际中常用且相对经济有效的解决地基工后沉降问题的方案^[1-3]。方案实施过程中,超载并非永久荷载,在软土地基表面持续作用一定时间达到预定的沉降要求后须卸除,然后施工上部建(构)筑物或加荷(如油罐充油等),期间地基土体会经历超载、卸载、回弹、再加荷的过程^[4-5]。运营期间,地基处于超固结状态,超载、卸荷、回弹和再加载的过程对运营期地基的工后沉降有重大影响^[6-7]。软土地区建(构)筑物产生的工后沉降主要由土体的次固结沉降控制。近年来,由次固结引起的工后沉降问题日益突出,给城市建设和经济发展带来严重影响。因此,研究竖井径向排水配合超载预压对软土次固结特性的影响和软土地基变形,对确保工程的安全营运和控制工后沉降具有重要的现实意义。

自1936年次固结系数概念首次被提出以来,国内外学者对软土次固结特性进行了大量试验研究,研究重点主要集中在软土次固结系数与荷载的关系及含水量、有机质含量、结构性等因素对次固结特性的影响方面^[8-12]。为了研究超载预压对软土次固结特性的影响,朱向荣等^[13]通过室内试验探讨了超载卸除后地基的次固结变形特征,得到了次固结系数随超载比变化的规律; Mesri等^[14]研究了超载和不超载条件下泥炭的次固结特性; Alonso等^[15]通过现场和室内重塑压缩试验,提出了计算工后次固结沉降的经验公式,并认为次固结系数是一个与时间无关的超固结比函数; 殷宗泽等^[16]提出相对时间坐标系与绝对时间坐标系的概念,基于 Bjerrum 等的 $e-\lg p$ 曲线模型揭示了超载预压减少次固结变形的机理; 周秋娟等^[17]通过固结试验研究了超载预压对软土次固结特性的影响,认为

次固结系数与土体先期固结压力有关; 李国维等^[5,7]采用软土重塑试样进行了超载卸荷后再压缩过程的一维压缩试验,研究了超载卸荷后再压缩软土的次固结特征,认为次固结系数和超载比之间具有规则的对应关系,可以用双曲线简化模型模拟。曾玲玲等^[18]通过对天然沉积土进行常规一维压缩试验和不同有效超载比下的超载预压一维压缩试验,分析了超载预压的天然沉积土次固结变形性状的影响。

目前,超载预压作用下软土次固结特性的研究仅考虑荷载的作用,竖井径向排水作用很少涉及,对工后沉降的计算忽略了应力历史对软土结构性的影响。本文在已有研究成果的基础上,考虑应力历史对软土结构性的影响,重塑洞庭湖软土,模拟现场工况,采用软土重塑试样进行超载预压后再压缩的一维固结蠕变试验,对比分析竖井径向排水对超载预压处理软土次固结特性的影响; 考虑应力历史,引入超载增量比,分析超载预压卸荷后加载软土次固结系数与超载增量比的关系,建立相应的计算模型,提出次固结沉降的计算公式。

1 超载预压软土次固结试验

1.1 重塑土制备

试验土样为淤泥质粉质黏土,取自南益高速公路软土路基,其基本物理性质指标见表1。制样时,将取得的原状土风干、研磨过0.05 mm的筛,倒入容器中掺水,泥浆含水量控制在原状土液限的1.5倍左右^[19],经过反复拌合脱气,将制备好的泥浆灌入底部铺土工布、四周铺塑料膜的模型箱中,在上覆盖土工布,以便排水,施加75 kPa固结压力,压实2个月。图1为压实重塑土照片。

表1 试验土样基本物理力学性质指标

Table 1 Basic physical and mechanical properties of the test soil samples

力学指标	密度/(g·m ⁻³)	含水量/%	土粒比重	孔隙比	压缩系数/MPa ⁻¹	液限/%	塑限/%	塑性指数	液性指数	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)
取值	1.81	43.6	2.62	1.08	1.02	45.1	26.3	18.8	0.92	5.4	12.25



图 1 重塑土压实

Fig. 1 Compression of the remolded soil

1.2 竖井排水试样制备

根据《建筑地基处理技术规范》(JGJ 79—2012)^[20] 竖向排水体的间距通常按井径比(n)确定($n=d_e/d_w$, d_e 为有效排水直径; d_w 为竖向排水体直径), 一般普通砂井的间距按 6~8 选用^[20]。为模拟堆载预压过程中土体固结排水, 根据相似准则, 取 $n=8$ 。制样时, 用环刀从压实重塑土中截取直径 79.8 mm、高 20.0 mm 且两端削平的土样模拟有效排水体, 然后用外径 10.0 mm、壁厚 0.1 mm 的空心钢管, 在土样中心掏出直径为 10.0 mm 的贯通圆孔模拟竖向排水体, 实际井径比接近 7.98。为保证排水效果, 圆孔中灌入标准砂, 填实密度为 1.55 g/cm³。图 2 为制备好的试样。

1.3 试验仪器

一维次固结试验在 WG 型单杠杆三联高压固结仪上进行, 杠杆比为 1:24, 试样高 2 cm, 截面积 50 cm², 试验过程中试样双面排水固结。

1.4 试验加载

为对比分析有竖井排水和无竖井排水条件下超载预压软土的次固结特征, 制备了相同数量的无竖井



图 2 竖井排水试样

Fig. 2 Shaft drainage sample

排水试样, 进行相同排水条件下的超载预压和无超载预压软土次固结试验。试验过程中, 对试样进行了编号, 编号规则如下: 数字前只有一个字母的, 第一个字母 D 表示有竖井排水试样, U 表示无竖井排水试样, 试样用来进行超载预压软土次固结试验; 数字前有 2 个字母的, 第一个字母表示意义同前, 第二个字母 N 表示试样用来进行无超载预压软土次固结试验。为简便起见, 重塑固结压力、预固结压力和卸荷后的再施加恒定固结压力分别用 p_c 、 p_{cs} 和 p 表示。

1.4.1 超载预压处理软土次固结试验

(1) 预固结压力为 200 kPa

D1[#]—D3[#]、U1[#]—U3[#] 试样: 预固结压力通过分级加载施加, 最后一级即为预固结压力 p_{cs} , 每级荷载依次为 50, 100, 200 kPa (最后一级为预固结压力), 每级加载后, 除最后一级维持荷载 24 h, 其余每级维持荷载 1 h, 然后卸载至 75 kPa (重塑固结压力), 让试样充分回弹 24 h 至变形基本稳定。开始次固结试验, 一次加载恒定固结压力, 分别为 125 kPa (D1[#]、U1[#] 样)、150 kPa (D2[#]、U2[#] 样)、175 kPa (D3[#]、U3[#] 样), 维持荷载 7 d。

(2) 预压固结压力为 300 kPa

D4[#]—D8[#]、U4[#]—U8[#] 试样: 按前述方式加载, 每级荷载依次为 50, 100, 200, 300 kPa (最后一级为预固结压力), 然后卸载至 75 kPa (重塑固结压力), 让试样充分回弹 24 h 至变形基本稳定。开始次固结试验, 一次加载恒定固结压力, 分别为 125 kPa (D4[#]、U4[#] 样)、150 kPa (D5[#]、U5[#] 样)、175 kPa (D6[#]、U6[#] 样)、200 kPa (D7[#]、U7[#] 样)、250 kPa (D8[#]、U8[#] 样), 维持荷载 7 d。

(3) 预固结压力为 400 kPa

D9[#]—D12[#]、U9[#]—U12[#] 试样: 按前述方式加载, 每

级荷载依次为 50, 100, 200, 300, 400 kPa(最后一级为预固结压力), 然后卸载至 75 kPa(重塑固结压力), 让试样充分回弹 24 h 至变形基本稳定。开始次固结试验, 一次加载恒定固结压力, 分别为 150 kPa(D9[#]、U9[#]样)、200 kPa(D10[#]、U10[#]样)、250 kPa(D11[#]、U11[#]样、300 kPa(D12[#]、U12[#]样), 维持荷载 7 d。

1.4.2 未经预压处理软土次固结试验

DN1[#]—DN4[#]试样、UN1[#]—UN4[#]试样: 每个试样分级加载, 每级荷载依次为 25, 50, 75 kPa(最后一级为重塑固结压力), 每级荷载维持 24 h, 开始次固结试验, 一次加载恒定固结压力, 分别为 125 kPa(DN1[#]、UN1[#]样)、150 kPa(DN2[#]、UN2[#]样)、200 kPa(DN3[#]、UN3[#]样)、250 kPa(DN4[#]、UN4[#]样), 维持荷载 7 d。

1.5 试验读数

次固结试验开始前, 无论是加载还是卸载, 参照《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)^[21], 按下列时间顺序测记试样高度的变化至加下一级荷载, 时间 6 s、15 s、1 min、2 min 15 s、4 min、6 min 15 s、9 min、12 min 15 s、16 min、20 min 15 s、25 min、30 min 15 s、36 min、42 min 15 s、49 min、64 min、100 min、

200 min、400 min、23 h、24 h^[21]。次固结试验开始后, 前 24 h 内参照《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)测读百分表, 24 h 后每隔 24 h 测读一次直至次固结试验结束。

2 次固结变形特性分析

2.1 超载和排水路径对软土主固结时间的影响

图 3~4 分别为通过 Casagrande 作图法确定的未经预压处理和已经超载预压处理软土的主固结时间(t)和孔隙比(e)的关系, 受篇幅所限, 图 4 中只列举了部分图片。图 3~4 显示, 未经预压处理软土的主固结时间为 100~110 min, 打设排水竖井对其主固结时间影响很少。经过超载预压处理的软土, 无论打设排水竖井与否, 其主固结时间大致相近, 为 30~40 min, 与预压荷载、卸荷后的再施加荷载的大小以及有无排水竖井无关。相对于未经预压处理的重塑软土, 经过超载预压的软土卸荷后再进行加载, 压缩变形过程中主固结时间明显缩短, 约为未经超载预压处理软土主固结时间的 1/3, 打设排水竖井对软土主固结时间几乎没影响。

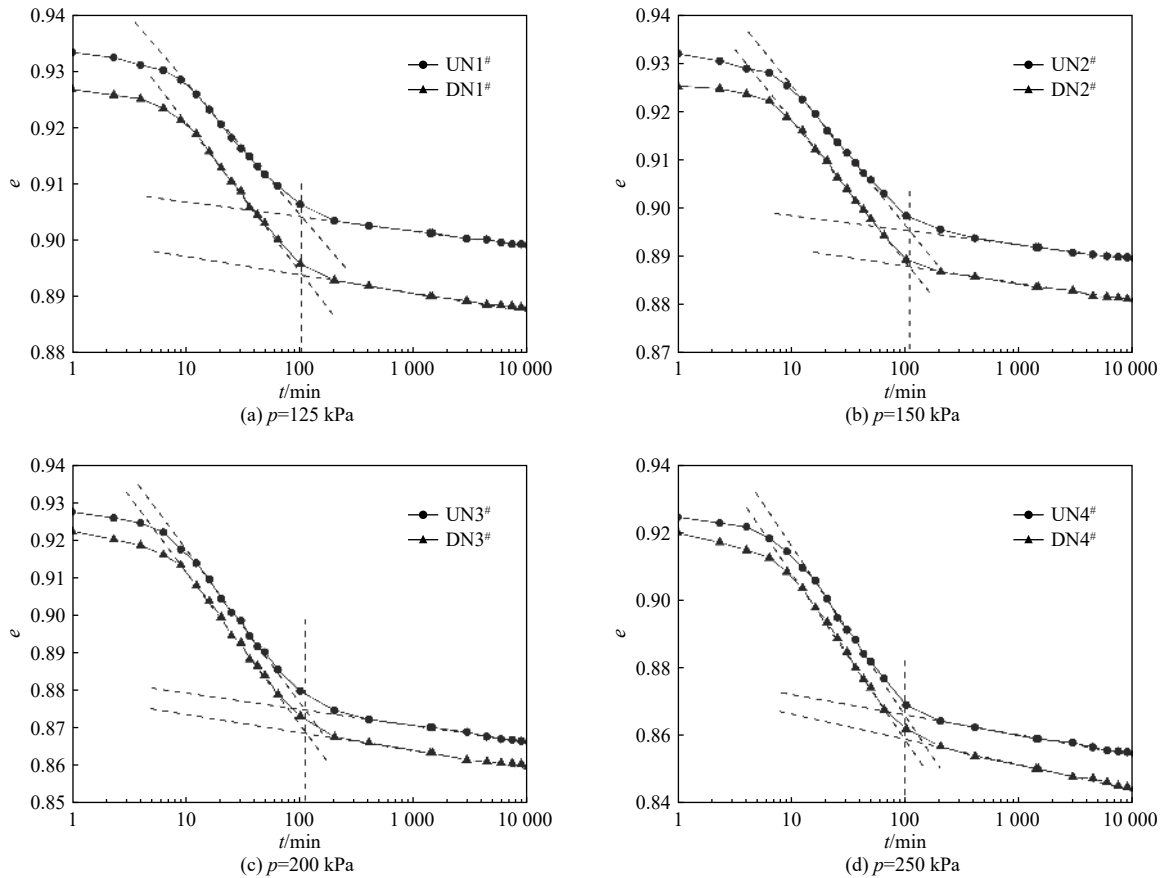


图 3 未经预压处理软土的主固结时间 ($p_{cs}=0$ kPa)

Fig. 3 Primary consolidation time of soft soil without preloading ($p_{cs}=0$ kPa)

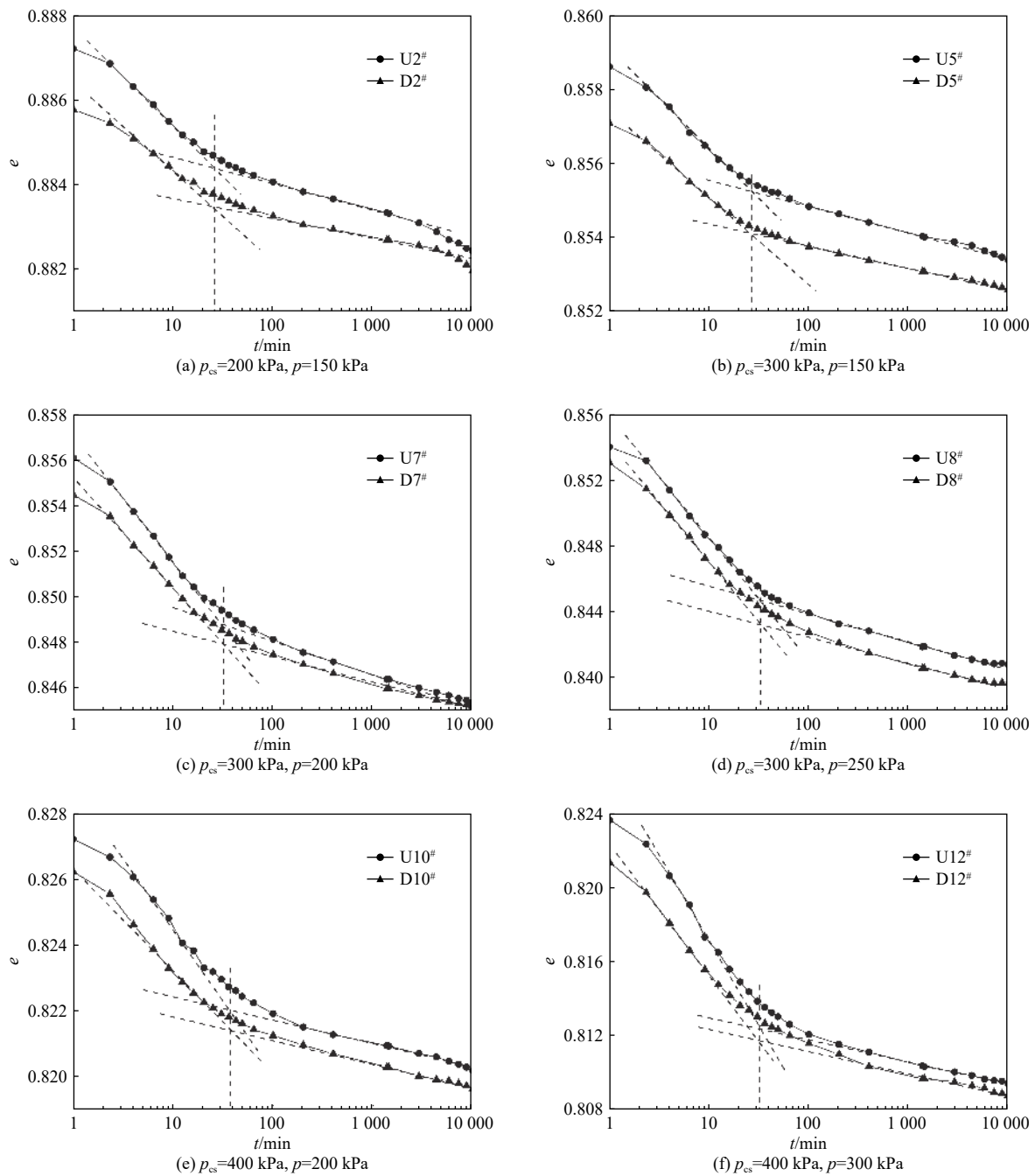


图 4 超载预压处理压软土的主固结时间

Fig. 4 Primary consolidation time of soft soil treated by overload preloading

2.2 超载和排水路径对软土次固结系数的影响

不同试验工况下的次固结系数采用下式计算^[16]:

$$C_{\alpha} = \Delta e_{\alpha} / \lg \frac{t_2}{t_1} \quad (1)$$

式中: C_{α} ——次固结系数;

Δe_{α} ——次固结阶段孔隙比的变化量;

t_1 ——主固结完成时间;

t_2 ——次压缩量计算时间。

目前,国内对次固结系数的测定时间没有明确的要求,参照文献 [22] 对次固结系数的测定时间的规定, t_1 取 1 440 min (1 d); t_2 取 10 080 min (7 d)。

表 2 为不同试验工况下的次固结系数。虽然图 3 ~ 4 中通过曲线尾部数点所作切线斜率变化不明显,但由表 2 可以清楚看出,对于未经预压处理的软土,随着作用荷载的增加,次固结系数增大;有排水竖井软土的次固结系数比无竖井排水软土的次固结系

数大, 增大幅度为 5.97% ~ 18.94%, 说明打设排水竖井, 不利于减小软土的次固结沉降。对于经过了超载预压的软土, 相同预压荷载作用下, 卸荷后再施加荷载, 随着再施加荷载增加, 次固结系数增大; 再施加荷载相同时, 作用在软土上的预压荷载越大, 次固结系数越小; 相对于未经预压处理的软土, 经过超载预压的软土卸荷后再进行加载, 其次固结系数明显减小; 说明超载预压利于消除软土的次固结沉降, 预压荷载越大, 效果越明显。预压荷载、施加荷载相同, 有竖井排水软土的次固结系数比无竖井排水软土的次固结系数小, 减小幅度在 6.66% ~ 27.01% 之间变化, 平均减小了 16.6%, 表明打设排水竖井, 有利于减小软土的次固结沉降。

表 2 不同试验工况下的次固结系数
Table 2 Secondary consolidation coefficient under different test conditions

预压荷载 /kPa	施加荷载 /kPa	次固结系数		
		$C_{aU}/\times 10^{-2}$ (无竖井排水)	$C_{aD}/\times 10^{-2}$ (有竖井排水)	$\frac{C_{aD}-C_{aU}}{C_{aU}}/\%$
0	125	0.191 6	0.227 9	18.94
	150	0.264 1	0.279 9	5.97
	200	0.426 9	0.468 9	9.85
	250	0.488 7	0.543 6	11.24
200	125	0.079 0	0.057 7	-27.01
	150	0.104 2	0.084 4	-19.02
	175	0.131 6	0.111 0	-15.66
300	125	0.045 3	0.039 7	-12.29
	150	0.074 6	0.057 2	-23.36
	175	0.100 3	0.073 9	-26.33
	200	0.117 7	0.091 3	-22.45
400	250	0.122 4	0.106 1	-13.30
	150	0.040 7	0.036 2	-11.16
	200	0.087 9	0.076 9	-12.49
	250	0.100 8	0.091 5	-9.22
	300	0.109 1	0.101 8	-6.66

2.3 超载预压软土次固结系数与超载增量比的关系

工程实际中, 在修建建(构)筑物前, 地基土层承受上覆土自重压力, 历史上土层曾经受过的最大压力称为先期固结压力, 按此定义, 重塑土预压前承受的重塑固结压力可视为先期固结压力。先期固结压力决定土层在在修建建(构)筑物前的密实状态, 超载预压卸荷后再加载, 软土的次固结沉降显然不仅仅与由地面预压荷载引起的预固结压力、建(构)筑物施工完毕后作用在土层上的恒定固结压力有关, 而且与先期固结压力有关。为了准确反映次固结系数与三者的关系, 引入超载增量比 (R_o), R_o 为土层受到的预固结

压力和先期固结压力的差值与作用在土层上的恒定固结压力和先期固结压力的差值之比, 其计算公式为:

$$R_o = \frac{p_{cs} - p_c}{p - p_c} \quad (2)$$

式中: p_{cs} ——地面超载在土层中引起的附加应力和上覆土层的自重应力之和;

p ——建(构)筑物荷载在土中引起的附加应力和上覆土层的自重应力之和。

以超载增量比 (R_o) 为横坐标, 次固结系数 (C_a) 为纵坐标, 绘制二者关系曲线, 见图 5。

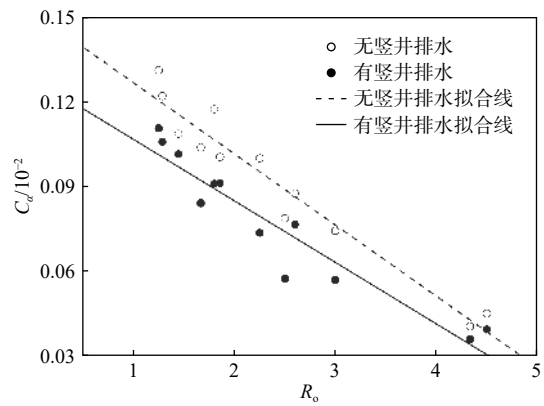


图 5 次固结系数 C_{aU} (C_{aD}) 与超载增量比 R_o 的关系
Fig. 5 Relationship between secondary consolidation coefficient C_{aU} (C_{aD}) and overload increment ratio R_o

图 5 中, 次固结系数与超载增量比呈线性递减关系, 且相关性很好, 可用下式拟合:

$$C_a = a - bR_o \quad (3)$$

式中: a 、 b ——拟合参数。

式(3)中的拟合参数见表 3。

表 3 拟合参数
Table 3 Fitting parameters

排水条件	a	b	R^2
无竖井排水	0.152 9	0.025 4	0.936 5
有竖井排水	0.128 9	0.021 7	0.893 3

3 工后次固结沉降计算

将式(1)中的 t_1 、 t_2 分别改为 t_0 、 t , 得

$$\Delta e_a = C_a \lg \frac{t}{t_0} \quad (4)$$

式中: t_0 ——工后主固结完成时间, 各土层性质不一样, 其主固结完成时间也不一样;

t ——工后次固结沉降计算时间。

地基处理设计中, 各层土的主固结完成时间 t_0 可

参照《建筑地基处理技术规范》(JGJ 79—2012)^[20] 确定,为主固结度达到 100% 的时间。

将式(3)代入式(4)得

$$\Delta e_{\alpha} = (a - bR_{0i}) \lg \frac{t}{t_0} \quad (5)$$

按照分层总和法计算地基沉降的方法,将次固结沉降计算深度范围内土层进行分层,地基的次固结沉降计算公式为:

$$s_{\alpha} = \sum_{i=1}^n \frac{\Delta e_{\alpha i}}{1 + e_{0i}} h_i \quad (6)$$

式中: s_{α} ——地基的次固结沉降;

h_i ——卸荷加载前第 i 层土的厚度;

e_{0i} ——第 i 层土卸荷加载前的初始孔隙比。

因各个分层土的性质、固结压力不一样,次固结阶段的孔隙比变化量也不一样,各个分层土次固结阶段的孔隙比变化量为:

$$\Delta e_{\alpha i} = (a_i - b_i R_{0i}) \lg \frac{t}{t_{0i}} \quad (7)$$

式中: a_i 、 b_i ——第 i 层土的拟合参数,由室内试验确定;

R_{0i} ——第 i 层土的超载增量比,由作用在第 i 层土层上的平均预固结压力、平均恒定压力和前期固结压力确定。

将式(7)代入式(6),得次固结沉降计算公式:

$$s_{\alpha} = \sum_{i=1}^n \frac{a_i - b_i R_{0i}}{1 + e_{0i}} h_i \lg \frac{t}{t_{0i}} \quad (8)$$

4 结论

(1) 经过超载预压的软土卸荷后进行再加载,压缩变形过程中主固结时间明显缩短,约为未经超载预压处理软土主固结时间的 1/3, 打设排水竖井对软土主固结时间几乎没影响。

(2) 预压荷载越大,次固结系数越小,超载预压有利于消除软土的次固结沉降;经过相同预压荷载处理的软土,随着建(构)筑物荷载的增加,次固结系数增大;打设排水竖井,未经预压处理软土的次固结系数略有增加,经过超载预压处理软土的次固结系数略有减小,但影响效果不是很明显。

(3) 经过超载预压处理的软土,其次固结系数与超载增量比呈线性递减关系,且具有良好的相关性。

(4) 根据次固结系数与超载增量比的关系式建立的次固结沉降计算公式,既反映了应力历史对软土次固结特性的影响,又反映了预压荷载和建(构)筑物荷

载对次固结系数的影响,适于进行工后次固结沉降计算。

参考文献 (References) :

- [1] 龚晓南. 地基处理手册[M]. 3版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008. [GONG Xiaonan. Foundation treatment manual[M]. 3rd ed. Beijing: China Architecture Building Press, 2008.(in Chinese)]
- [2] 雷鸣, 王星华, 唐依民. 基于孔压实测资料的真空预压机理及沉降计算探讨[J]. 水文地质工程地质, 2010, 37(6): 81 - 85. [LEI Ming, WANG Xinghua, TANG Yimin. Discussion of the mechanism of vacuum preloading and settlement calculation based on measured values of pore water pressure[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2010, 37(6): 81 - 85. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 刘景锦, 雷华阳, 卢海滨, 等. 真空预压法淤堵泥层形成机理及预测模型研究[J]. 水文地质工程地质, 2017, 44(3): 61 - 71. [LIU Jingjin, LEI Huayang, LU Haibin, et al. A study of siltation mud formation mechanism and prediction model of vacuum preloading method[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2017, 44(3): 61 - 71. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 周顺华, 许恺, 王炳龙, 等. 软土地基超载卸载再加荷的沉降研究[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(10): 1226 - 1229. [ZHOU Shunhua, XU Kai, WANG Binglong, et al. Research on settlement of soft ground under overloading-unloading and reloading[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(10): 1226 - 1229. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 李国维, 杨涛, 殷宗泽. 公路软基超载预压机理研究[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(7): 896 - 901. [LI Guowei, YANG Tao, YIN Zongze. Study of mechanism about surcharge preloading method on the soft ground of highways[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(7): 896 - 901. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 胡亚元. 考虑次压缩时分级超载预压时间的确定方法[J]. 浙江大学学报(工学版), 2010, 44(5): 962 - 968. [HU Yayuan. Method of determining duration of stage constructed surcharge preloading with a view to second settlement[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2010, 44(5): 962 - 968. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 李国维, 盛维高, 蒋华忠, 等. 超载卸荷后再压缩软土的次压缩特征及变形计算[J]. 岩土工程学报, 2009,

- 31(1): 118 – 123. [LI Guowei, SHENG Weigao, JIANG Huazhong, et al. Secondary compression characteristics and settlement calculation of soft clay under overloading-unloading and reloading[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2009, 31(1): 118 – 123. (in Chinese with English abstract)]
- [8] XU G Z, YIN J. Compression behavior of secondary clay minerals at high initial water contents[J]. *Marine Georesources & Geotechnology*, 2016, 34(8): 721 – 728.
- [9] SHAHRIAR A R, JADID R. An experimental investigation on the effect of thixotropic aging on primary and secondary compression of reconstituted dredged clays[J]. *Applied Clay Science*, 2018, 162: 524 – 533.
- [10] WU Z L, DENG Y F, CUI Y J, et al. Investigations on secondary compression behaviours of artificial soft sand-clay mixtures[J]. *Soils and Foundations*, 2019, 59(2): 326 – 336.
- [11] 桂跃, 余志华, 刘海明, 等. 高原湖相泥炭土次固结特性及机理分析[J]. *岩土工程学报*, 2015, 37(8): 1390 – 1398. [GUI Yue, YU Zhihua, LIU Haiming, et al. Secondary consolidation properties and mechanism of plateau lacustrine peaty soil[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2015, 37(8): 1390 – 1398. (in Chinese with English abstract)]
- [12] IMAI Y, AKAISHI M, HUANG W C, et al. Long-term settlement behavior of soft grounds and secondary compression[J]. *Journal of the Chinese Institute of Engineers*, 2017, 40(5): 361 – 369.
- [13] 朱向荣, 潘秋元. 超载卸除后地基变形的研究[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 1991, 25(2): 246 – 257. [ZHU Xiangrong, PAN Qiuyuan. The deformation of subsoil after surcharge unloading[J]. *Journal of Zhejiang University(Engineering Science)*, 1991, 25(2): 246 – 257. (in Chinese with English abstract)]
- [14] MESRI G, STARK T D, AJLOUNI M A, et al. Secondary compression of peat with or without surcharging[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 1997, 123(5): 411 – 421.
- [15] ALONSO E E, GENS A, LLORET A. Precompression design for secondary settlement reduction[J]. *Géotechnique*, 2000, 50(6): 645 – 656.
- [16] 殷宗泽, 张海波, 朱俊高, 等. 软土的次固结[J]. *岩土工程学报*, 2003, 25(5): 521 – 526. [YIN Zongze, ZHANG Haibo, ZHU Jungao, et al. Secondary consolidation of soft soils[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2003, 25(5): 521 – 526. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 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 with English abstract)]
- [18] 曾玲玲, 陈福全, 郭立群. 天然沉积结构性软土的超载预压变形性状试验[J]. *华侨大学学报(自然科学版)*, 2012, 33(4): 435 – 439. [ZENG Lingling, CHEN Fuquan, GUO Liqun. Experimental study on deformation behavior of surcharge preloading for soft natural clays[J]. *Journal of Huaqiao University(Natural Science)*, 2012, 33(4): 435 – 439. (in Chinese with English abstract)]
- [19] CAI Y Q, HAO B B, GU C, et al. Effect of anisotropic consolidation stress paths on the undrained shear behavior of reconstituted Wenzhou clay[J]. *Engineering Geology*, 2018, 242: 23 – 33.
- [20] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑地基处理技术规范: JGJ 79—2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013. [Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical code for ground treatment of buildings: JGJ 79—2012[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2013. (in Chinese)]
- [21] 中华人民共和国水利部. 土工试验方法标准: GB/T 50123—2019[S]. 北京: 中国计划出版社, 2019. [Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Standard for geotechnical testing method: GB/T 50123—2019[S]. Beijing: China Planning Press, 2019. (in Chinese)]
- [22] Methods of test for soils for civil engineering purposes—Part 5: Compressibility, permeability and durability tests: BS 1377—5:1990[S].

编辑: 汪美华