

## 不同填料顺序下路基沉降分析

王远航<sup>1,2</sup>, 张福海<sup>1,2</sup>, 周天宝<sup>1,2</sup>, 左庆松<sup>3</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. 河海大学 江苏省岩土工程技术工程研究中心, 江苏 南京 210098; 3. 中车建设工程有限公司, 北京 100078)

**摘要:** 针对杨林船闸原状淤泥质土, 进行一维压缩试验, 研究一次加荷和多次加荷试验下的固结特性。结合典型路基断面, 运用 ABAQUS 软件建立时间硬化蠕变模型和 D-P 弹塑性模型, 得到不同填料顺序下杨林船闸附近高速公路路基工后沉降。试验表明, 多次加荷试验下, 主、次固结的分界点时间变大, 即多次加荷试验主固结完成时间大于一次加荷试验主固结完成时间。模拟结果显示, 未考虑蠕变情况下路基沉降量小于考虑蠕变情况下路基沉降量。把蠕变考虑进来时一次填料计算的沉降量大于多次填料计算的沉降量, 同时也验证了多次加荷可有效降低次固结沉降。

**关键词:** 淤泥质土; 一维压缩; 时间硬化蠕变模型; 次固结; 路基沉降

**中图分类号:** TU 443

**文献标识码:** A

## Subgrade settlement analysis under different filler sequence

WANG Yuanhang<sup>1,2</sup>, ZHANG Fuhai<sup>1,2</sup>, ZHOU Tianbao<sup>1,2</sup>, ZUO Qingsong<sup>3</sup>

(1. Key laboratory of Ministry of Education of Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China; 2. Jiangsu Research Center for Geomechanical Engineering Technology, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China; 3. CCRC CONSTRUCTION ENGRG.CO, LTG Beijing 100078)

**Abstract:** A series of one-dimensional compression tests were carried out under different loading processes of Yanglin shiplock. Different consolidation loading steps were studied. The time-hardening creep model and extended D-P model were used to obtain the subgrade settlement after construction in different loading methods and the subgrade was taken from the highway near Yanglin shiplock. The results show that under the multistage loading test, the time between the main and secondary consolidation points is larger, which indicates that the completion time of the main consolidation is higher than that of the first loading test. Simulation results show that the subgrade settlement without considering the creep situation is smaller than that with considering the creep situation. In the case of considering the creep situation, the settlement of the single loading is greater than the multi-stage loading. The correction of multi-stage loading for reducing subsidence settlement is verified.

**Key words:** mucky soil; one-dimensional compression; time-hardening creep model; secondary consolidation; subgrade settlement.

我国南方地区尤其是长三角、珠三角等地区城市发展迅速, 因为土地资源的日益紧张, 越来越多的城市再建过程中将原有水域填平, 然后在上层发展新的城市功能区。这些城市功能区如武汉城市新区属于典型的牛扼湖相软土区域, 是长江中游泥砂长期沉积形成的大面积软土区域。张诚厚<sup>[1-3]</sup>等专

家运用试验和数值计算的手段对软土次固结进行研究, 得出次固结沉降量占总沉降量的比例为 5% ~ 30%。其中由于土质和研究手段的不同, 研究结果差别较大<sup>[4-10]</sup>。因此对于深厚软粘土层次固结沉降的精确计算和减小次固结沉降量成为一个迫在眉睫的任务。

收稿日期: 2018-06-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51778211); 江苏省自然科学基金资助项目(BK20171434)

作者简介: 王远航(1994-), 男, 江苏宿迁人, 硕士研究生, 研究方向为软土地基处理。

加荷工序和荷载施加间隔时间对次固结的影响是当今建筑物尤其是以深厚软粘土作为地基的建筑物的沉降问题产生的一个原因。由于土的结构性特点,加荷过程不仅对软土地基土体的主固结有影响,对软土地基土体的次固结也有较大的影响,尤其是对于地基为深厚软粘土的地基次固结影响更加显著。本文试验采用杨林船闸地基下深度为4.5 m处的淤泥质土原状样进行室内一维压缩试验,采用一次加荷试验和多次加荷试验对软土次固结特性影响进行研究,同时选择时间硬化蠕变模型对土体的蠕变性质进行数值模拟分析。

## 1 室内试验

### 1.1 试验方案

试验采用杨林船闸地基下深度为4.5 m处的淤泥质土原状样(表1),试样直径为6.18 cm,高度为2 cm。仪器选用单轴压缩固结仪,进行室内一维压缩试验。由于试验控制条件比较复杂,为简化边界条件影响采用一维压缩试验进行研究,根据荷载施加间隔时间不同,加载方式采用一次加荷试验和多次加荷试验。一次加荷试验组采用常规分级加载试验,每级荷载在上一级荷载作用稳定的情况下施加,得到不同应力水平下的蠕变曲线,其中下一级荷载通过砝码一次施加到试样上面。多次加荷试验将每级荷载分两次施加,假设常规分级加载试验下一级荷载增量为 $\Delta P$ ,则荷载分级施加情况为:第一级荷载强度 $P1=50\% \Delta P$ 、第二级荷载强度 $P2=50\% \Delta P$ ,其中 $P1$ 与 $P2$ 之间间隔时间利用固结度控制,统一固结度为50%。

### 1.2 试验结果和分析

常规分级加载试验荷载采用25、50、100、200、400、800、1 600 kPa。正常加载(按变形量小于0.01 mm为准,加载下一级)约3~5 d。图1和图2反映了不同加荷下实验组孔隙比与时间关系曲线。

由于软土蠕变受温度影响显著,本文为减小温度变化对次固结试验结果的影响,将试验场地设在

温度控制在20℃左右的地下室,保证实验过程中温度恒定且适合次固结试验的进行,且最大程度降低了温度对次固结的影响。加载方式采用一次加荷试验和多次加荷试验。

由图1和图2发现:两者都随着固结压力的增大,主、次固结的时间分界点逐渐减小,即固结压力越大,拐点越早出现,主固结完成速度越快。一次加荷试验的拐点出现在20~90 min,多次加荷试验的拐点在40~100 min处出现。当固结压力相同时,多级加荷试验组拐点出现时间大于一次加荷试验组拐点出现时间,可以理解为:多级加荷试验下,主、次固结的分界点时间变大,说明多级加荷试验主固结完成时间大于一次加荷试验主固结完成时间。在工程上荷载分级施加的这种性质延长了施工时间,对于施工进度的控制是不利的,因此在施工过程中

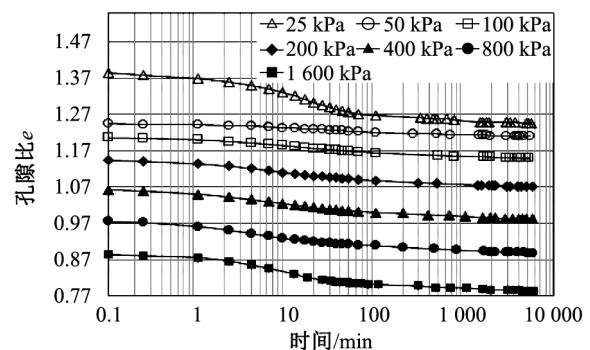


图1 一次加荷实验组孔隙比与时间关系

Fig.1 The relationship between pore ratio and time in one loading experiment group

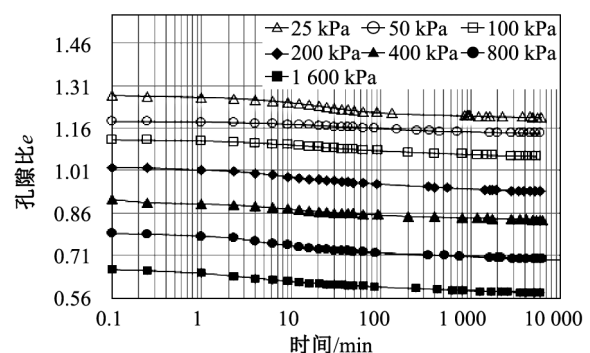


图2 多次加荷实验组孔隙比与时间关系

Fig.2 The relationship between pore ratio and time in multiple loading experimental group

表1 淤泥质土基本物理性质指标  
Tab.1 Basic physical properties of mucky soil

含水率/%	孔隙比	塑限/%	液限/%	塑性指数	比重	粘粒含量/%	有机质含量/%	土质类型
55.1	1.39	25.3	51.9	26.6	2.67	56	3.08	CH

需要合理增加设置沙井、排水板等增加排水速率的措施达到缩短主固结时间的效果，缩短施工工期。

### 1.3 时间硬化蠕变参数确定

一般来说对土体蠕变变形进行研究时需要考虑温度、时间、应力大小三因素，可用方程  $\varepsilon=f(T, \sigma, t)$  来表达。当应力恒定时，它的表达式是：

$$\ln \varepsilon = \frac{A}{m+1} n \ln \sigma + (m+1) \ln t$$

其中  $\varepsilon$  为土体蠕变量； $m$ 、 $n$  分别在时间和应力上对土体蠕变进行把控（由试验拟合确定）； $t$  是时间。

由公式可知，当偏应力  $\sigma$  为一定值， $\ln \varepsilon - \ln t$  呈线性关系；同理当  $t$  为一定值时， $\ln \varepsilon - \ln \sigma$  也呈线性关系，所以根据斜率可确定  $m$ 、 $n$  值，将计算所得的  $m$ 、 $n$  带入上式即得  $A$  值。

图 3 很好地呈现了  $\ln \varepsilon - \ln t$  之间的线性关系，可得一次加荷分级试验下的  $m$  值。同理可得到多级加荷时  $m$  和  $n$  值。表 2 给出了不同加荷条件下时间硬化蠕变参数的取值。

## 2 路基沉降模型计算

### 2.1 有限元模型建立

本文为验证蠕变和多次加荷对于软土次固结沉降的影响，将路基的填料过程分为一次填料和多次填料，对应于试验中一次加荷试验、多次加荷试验。即考虑一次填料未考虑蠕变和考虑蠕变、多次填料未考虑蠕变和考虑蠕变四种情况。

为了加快排水，在地基表面和填料结束的中间设置 0.5 m 厚的碎石垫层，其模型参数根据经验确定。淤泥质土层厚度 15 m 在下，粉质粘土层厚度 15 m 在上。模型计算深度为 30 m，宽度为 100 m。设计路堤填料顶高 6 m，路堤边坡为 1:1.5，坡顶宽度为 6 m。针对于一次填料过程，采用在 60 d 内，一次均匀的填高到 6 m。多次填料过程采用 30 d 连续填

料到 3 m 高，然后停止填料 90 d（这里为与试验部分相对应，时间为第一级填料固结度为 50% 对应的时间），然后连续 30 d 均匀填料到 6 m 的高度。

路基填料和粉质粘土采用弹塑性模型 D-P 模型进行模拟，淤泥质土层用时间硬化蠕变模型与 D-P 弹塑性模型耦合模型进行模拟，计算参数见表 3。

### 2.2 计算结果及分析

填料完成 20 年后，对路基沉降最大点（中间位置）分析研究。由图 4 可知，当时间为 1 073 d 时，未考虑蠕变的情况下的沉降量不再变化，说明土体在 1 073 d 时超孔隙水压力基本消散，对于考虑蠕变的情况，理论上可以认为 1 073 d 以后的沉降量为次固结沉降。一次填料考虑蠕变计算中，1 073 d 时的沉降量为 54.97 cm，7 451 d 时沉降量为 60.04 cm。

对于多次填料未考虑蠕变的情况，当时间为 1 163 d 时沉降量为 47.42 cm，此后不再变化，因此可认为对于多次填料考虑蠕变情况下 1 163 d 以后路

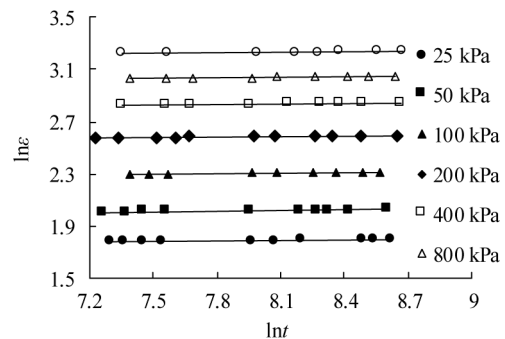


图 3 一次加荷下应变随时间变化关系

Fig.3 The variation of strain with time under one loading

表 2 不同加荷条件下时间硬化蠕变参数的取值  
Tab.2 Value of time hardening creep parameters under different loading conditions

蠕变参数	$m$	$n$	$A/10^{-5}$
一次加荷	-0.987	0.357 1	1.74
多次加荷	-0.992	0.308 5	1.61

表 3 地基土分层及相应的模型计算参数

Tab.3 Foundation soil stratification and corresponding model calculation parameters

土层名称	重度 $\gamma/(kN \cdot m^{-3})$	$d/kPa$	$\beta/^\circ$	$E/MPa$	$\nu$	厚度 /m	$k/( \times 10^{-6} cm/s^{-1})$
路基填料	20	29.15	43.5	30	0.25	6	8
淤泥质土	17.9	12.18	30.46	3.68	0.4	20	0.2
粉质粘土	19.3	30.51	23.29	3.9	0.35	10	1
垫层	20	1.42	39.39	100	0.15	0.5	-

基发生的沉降均为次固结沉降。多次填料考虑蠕变情况下 1 163 d 沉降量为 52.42 cm, 7 451 d 沉降量为 56.82 cm。在图 5 局部图中, 两次填料中间时间段和停止填料后沉降缓慢进行, 说明填料过程与沉降量发展具有一定的相关性, 也就是填料过程中沉降量发展明显快于填料停止时沉降量的发展过程。

一次填料情况下次固结沉降量为 5.07 cm, 多次填料情况下次固结沉降量为 4.40 cm, 一次填料情况下次固结大于多次填料情况下次固结沉降量。验证了试验中得出多级加荷降低次固结沉降的效果。一次填料未考虑蠕变沉降量为 50.73 cm, 多次填料未考虑蠕变沉降量为 47.42 cm, 一次填料考虑蠕变沉降量为 60.04 cm, 多次填料考虑蠕变沉降量为 56.82 cm, 说明采用多次填料的方式具有降低沉降的效果。由上面的分析可知: 多次填料过程具有降低沉降的效果, 将次固结沉降在总沉降量中分离出来考虑时, 多次填料次固结沉降量小于一次填料次固结沉降量, 与前面试验中得到的多次加荷减小次固结的结论相互验证, 说明了工程上采用多次填料

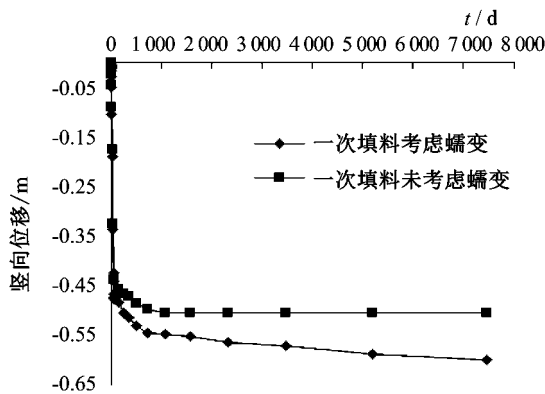


图 4 一次填料下沉量随时间变化关系  
Fig.4 The relationship between settlement and time under one filling

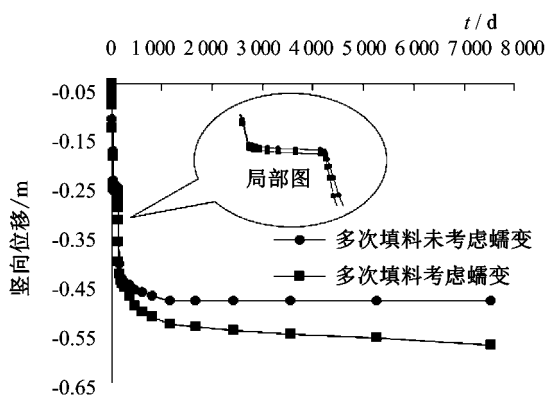


图 5 多次填料下沉量随时间变化关系  
Fig.5 The relationship between settlement and time under multiple filling

的方式具有一定的科学性。

图 6 为多次填料超孔隙水压力随时间变化曲线关系图。由图可得, 填料的过程中超孔隙水压力随着时间的延长而增加。当不进行填料时超孔隙水压力变小, 即土体在处于主固结的阶段。随着填料的结束超孔隙水压力逐渐消散, 当时间为 1 000 d 左右时超孔隙水压力接近于 0 kPa, 说明此时超孔隙水压力基本消散, 验证了上面以 1 100 d 以后的沉降量作为次固结沉降量对比的科学性。另外第二次填料开始时刻超孔隙水压力为 5.58 kPa, 第一次填料结束时超孔隙水压力为 11.12 kPa, 说明第二次填料开始时刻为第一次填料后固结度为 50% 的时间, 与试验部分第二级加荷时间为 50% 固结度所对应时间相对应。

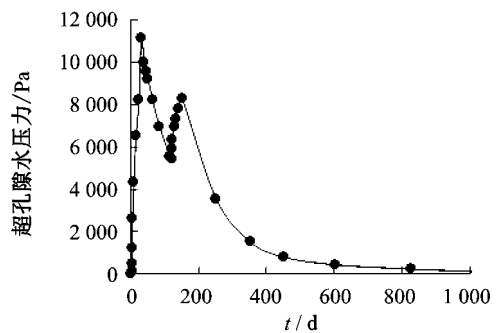


图 6 多次填料下超孔隙水压力随时间变化  
Fig.6 The relationship between excess pore water pressure and time under multiple filling

### 3 结论

- 1) 多次加荷试验下, 主、次固结的分界点时间变大, 说明多级加荷试验主固结完成时间大于一次加荷试验主固结完成时间。
- 2) 一次填料情况下计算得到的沉降值大于多次填土情况下计算得到的沉降值。多次填料情况下次固结沉降计算值小于一次填料情况下次固结沉降计算值。
- 3) 填料时超孔隙水压力增加, 停止填料时超孔隙水压力减小。当填料结束 1 100 d 时超孔隙水压力几乎为 0 kPa, 验证了前面以 1 100 d 以后的沉降量作为次固结沉降量的正确性。

#### 参考文献:

[1] 张诚厚, 袁文明, 戴济群. 软粘土的结构及其对路基沉降的影响 [J]. 岩土工程学报, 1999, 17(5): 25-32.  
[2] 王盛源. 饱和粘性土主固结与次固结 (下转第 69 页)

- [2] 赵永宏, 邓祥征, 战金艳, 等. 我国湖泊富营养化防治与控制策略研究进展 [J]. 环境科学与技术, 2010(3): 92-98.
- [3] DUAN H T, MAR R H, ZHANG Y Z, et al. A new three-band algorithm for estimating chlorophyll concentrations in turbid inland lakes [J]. Environmental Research Letters, 2010, 5(4): 44009.
- [4] 史锐, 张红, 岳荣, 等. 基于小波理论的干旱区内陆湖泊叶绿素 a 的 TM 影像遥感反演 [J]. 生态学报, 2017(3): 1043-1053.
- [5] BRESCIANI M, GIARDINO C, STROPPIANA D, et al. Retrospective analysis of spatial and temporal variability of chlorophyll-a in the Curonian Lagoon [J]. Journal of Coastal Conservation, 2012, 16(4): 511-519.
- [6] WATANABE F S, ALCANTARA E, RODRIGUES T W, et al. Estimation of Chlorophyll-a Concentration and the Trophic State of the Barra Bonita Hydroelectric Reservoir Using OLI/Landsat-8 Images [J]. Int J Environ Res Public Health, 2015, 12(9): 10391-10417.
- [7] 郑震. 基于 OLI 遥感影像的叶绿素 a 质量浓度反演研究 [J]. 灌溉排水学报, 2017, 36(3): 89-93.
- [8] 李云亮, 张运林. 基于 TM 影像的太湖夏季悬浮物和叶绿素 a 浓度反演 [J]. 遥感信息, 2008(6): 22-27.
- [9] SUN D, LI Y, WANG Q. A Unified Model for Remotely Estimating Chlorophyll a in Lake Taihu, China, Based on SVM and In Situ Hyperspectral Data [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2009, 47(8): 2957-2965.
- [10] 金相灿, 刘鸿亮, 屠清瑛. 中国湖泊富营养化 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990.

(责任编辑 王利君)

(上接第 54 页)

- 变形分析 [J]. 岩土工程学报, 1992, 14(5): 70-75.
- [3] 张迎春, 刘吉福, 魏金霞. 砂井地基主、次固结度粘弹性分析 [J]. 水运工程, 2003, 355(8): 20-24.
- [4] 廖红建, 苏立君, 白子博明, 等. 次固结沉降对压缩时间曲线的影响研究 [J]. 岩石力学, 2002, 23(5): 636-640.
- [5] 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.
- [6] CHAI J C, MIURA N. Traffic-load-induced permanent deformation of road on soft subsoil [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 2002, 128(11): 907-916.
- [7] BJERRUM L. Embankments on soft ground [C]// Proceedings of the Specialty Conference on Performance of Earth and Earth-supported Structures. Purdue University: ASCE, 1972: 1-54.
- [8] 李国维, 胡坚, 陆晓岑, 等. 超固结软黏土一维蠕变次固结系数与侧压力系数 [J]. 岩土工程学报, 2012, 34(2): 2198-2205.
- [9] 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.
- [10] 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.

(责任编辑 王利君)

(上接第 59 页)

- 深基坑开挖过程数值分析 [J]. 河北工程大学学报: 自然科学版, 2008, 25(3): 15-18.
- [11] 李晶晶, 程祖锋, 耿立立, 等. 基于 FLAC3D 的复合土钉支护数值模拟分析 [J]. 河北工程大学学报: 自然科学版, 2011, 28(3): 5-8.
- [12] 张玉伟, 谢永利, 翁木生. 非对称基坑开挖对下卧地铁隧道影响的离心试验 [J]. 岩石力学, 2018, 39(7): 1-8.
- [13] 金小荣, 俞建霖, 祝哨晨, 等. 基坑降水引起周围土体沉降性状分析 [J]. 岩土力学, 2005, 26(10): 1575-1581.
- [14] 杨清源, 赵伯明, 孙凤伯, 等. 潜水层基坑降水引起地表沉降试验与理论研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(10): 1-14.
- [15] 刘历波, 王晓磊, 史三元. 基坑开挖过程中地下水渗流数值模拟 [J]. 河北工程大学学报: 自然科学版, 2013, 30(3): 13-16.

(责任编辑 王利君)