

超液限吹填黏土在主固结阶段的次固结特性试验研究

沈 扬^{1, 2}, 李海龙^{1, 2}, 费仲秋^{1, 2}, 刘汉龙^{1, 2}

(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. 河海大学岩土工程科学研究所, 江苏 南京 210098)

摘 要: 对温州滨海重塑吹填黏土进行了一维固结试验, 并将不同含水率、竖向荷载及反压条件得到的试验结果对比分析。研究表明: 次固结沉降在主固结阶段便已经发生, 且受有效应力持续时间和孔压水平联合影响。当试样含水率较低时, 次固结开展主要受有效应力持续时间影响; 而当含水率较高, 远超液限时, 次固结主要受孔压水平影响。并通过不同反压水平的固结试验, 进一步验证了高孔压水平对次固结开展的促进作用。进而表明, 孔压和位移两种固结度标准存在明显差异不仅源于压缩模量随有效应力增加, 两种固结度受次固结影响程度不同也是造成差异的重要因素。**关键词:** 吹填土; 主固结; 次固结; 孔压固结度; 位移固结度

中图分类号: TU44

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2013)S2-0522-06

作者简介: 沈 扬(1980-), 男, 浙江杭州人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为土体本构理论和地基处理。
E-mail: shenyang1998@163.com。

Secondary consolidation properties of dredger fill with over liquid limit at primary consolidation stage

SHEN Yang^{1, 2}, LI Hai-long^{1, 2}, FEI Zhong-qi^{1, 2}, LIU Han-long^{1, 2}

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Geotechnical Research Institute, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: One-dimensional consolidation experiments are performed to study the secondary consolidation properties of remolded dredger soft soils from Wenzhou. The results show that the secondary consolidation occurs at the primary stage, and is influenced by both effective stress and pore pressure potential. When the moisture content is rather low, the former is the dominant element. However, when the moisture content is much higher than the liquid limit, the latter is the dominant element. The development of the secondary consolidation promoted by high pore pressure is further verified through the consolidation tests with different back pressure levels. Therefore, the secondary consolidation has different influences on the evolution of pore pressure and deformation. It causes the distinction between the consolidation degrees of pore pressure and deformation, as well as the compressive modulus changing with the effective stress.

Key words: dredger fill; primary consolidation; secondary consolidation; consolidation degree of pore pressure; consolidation degree of deformation

0 引 言

随着中国沿海地区经济高速发展, 填海造陆工程规模日益扩大, 据不完全统计, 截止2008年, 江苏、浙江、福建、广东等10省市围海造地面积将近800万亩。重大工程对吹填土地基长期稳定有很高要求, 而围海造地的新近饱和吹填土地基通常富含黏粒, 具有含水率高、孔隙比大, 强度低、压缩性高等特点, 而且固结中次固结沉降所占比重大, 如何对主、次固结予以区分, 进而合理评价各种固结的发展程度, 对地基稳定和长期变形的分析计算至关重要。

目前已有较多学者对次固结特性开展了研究。就次固结影响因素而言, 主要包括应力历史、荷载、加

载比、加载时间、加载时间间隔、固结应力水平、超载预压和结构性等^[1-5]。虽已有不少学者^[6-7]认为主、次固结同时发生, 但在实际计算中, 更多的方法仍是基于固结过程中 $e - \lg p$ 曲线提出的判别主固结结束后的次固结计算^[8-9], 而主固结阶段中次固结的沉降很少被直接分析和计算, 其中一个重要的原因就是较难识别主固结阶段的次固结变形和程度。而主、次固结产生机理不同, 所对应计算的理论和分析方法亦有差别, 因此如能将主固结阶段中的主、次固结予以区分, 有

基金项目: 国家自然科学基金项目(U1134207); 长江学者和创新团队发展计划资助项目(IRT1125)

收稿日期: 2013-07-17

利于更全面评价次固结影响因素, 进而提高主固结预测的准确度。特别当土体含水率、黏粒含量提高, 次固结特性显著时, 更有必要将主固结阶段中的主、次予以区分。

基于上述研究现状, 笔者以浙江温州地区超液限条件的吹填黏土为对象, 进行了不同含水率、不同竖向固结应力及反压条件下的一维固结试验, 通过对比分析固结中孔压、应变等参数的开展特征, 揭示了次固结在主固结阶段中便已发生, 并分析了主固结过程中次固结发展程度的影响因素和耦合作用。

1 试验方案

1.1 土的基本物理性质

试验用土取自温州滨海吹填土工程。土样级配曲线如图 1 所示。

土样比重 2.73, 液限 35%, 塑限 19%, 渗透系数 5.0×10^{-7} cm/s, 判别为低液塑限黏土。虽然该吹填土液限不高, 但有相当研究表明, 较低液塑限软土(液限大约 30%~45%、塑限大约 15%~30%)在一定条件下土体次固结特性依然明显^[1, 9]。且土样在吹填现场的初始含水率高达 100%~120%, 经处理后表层吹填土含水率仍有 40%~50%, 这种超液限的状态, 更为次固结开展提供了可能。

1.2 试验仪器

试验采用 Rowe & Barden 型固结仪, 系英国 GDS 公司研制、完全由计算机控制并记录保存试验数据的

一维固结试验系统。较之常规一维固结仪, 其能全面测定土体固结特性, 时刻记录固结过程中土体的孔压开展情况, 以及全程控制反压水平。为分析主固结阶段中的次固结特性提供可能。试样为圆柱形, 内直径 76.20 mm, 高 20 mm。

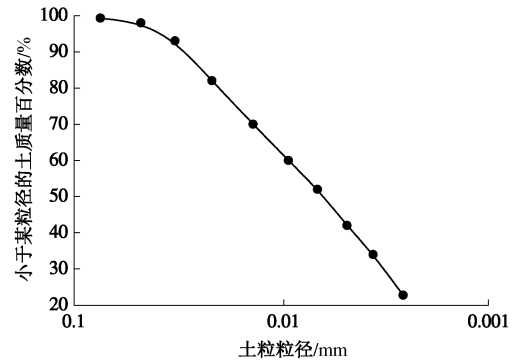


图 1 颗粒粒径分布曲线

Fig. 1 Grain size distribution curves

1.3 基本试验方案

配制含水率为 50%, 60%, 70% 的重塑饱和黏土试样, 各级含水率试样均进行固结应力水平为 100, 200, 300, 400 kPa 的一维固结试验, 部分试样在固结过程前同步施加恒定反压(反压是指有效应力不变, 增加试样内的孔隙水压力), 以使最终竖向有效应力相同, 但孔压基准值不同。试验分类如表 1 所示, 方案不同之目的将在结果分析中阐述。根据《土工试验规程》(SL237—1999) 规定, 以固结沉降 24 h 判别为固结稳定, 终止试验。

表 1 固结试验各试样加载路径特征表

Table 1 Loading paths of samples in consolidation tests

| 试样名称 | 初始含水率 /% | 竖向固结应力 /kPa | 反压 /kPa | 试样名称 | 初始含水率 /% | 竖向固结应力 /kPa | 反压 /kPa |
|------|----------|-------------|---------|------|----------|-------------|---------|
| S510 | 50 | 100 | 0 | S522 | 50 | 200 | 200 |
| S520 | 50 | 200 | 0 | S524 | 50 | 200 | 400 |
| S530 | 50 | 300 | 0 | S532 | 50 | 300 | 200 |
| S540 | 50 | 400 | 0 | S534 | 50 | 300 | 400 |
| S610 | 60 | 100 | 0 | S542 | 50 | 400 | 200 |
| S620 | 60 | 200 | 0 | S544 | 50 | 400 | 400 |
| S630 | 60 | 300 | 0 | S722 | 70 | 200 | 200 |
| S640 | 60 | 400 | 0 | S724 | 70 | 200 | 400 |
| S710 | 70 | 100 | 0 | S732 | 70 | 300 | 200 |
| S720 | 70 | 200 | 0 | S734 | 70 | 300 | 400 |
| S730 | 70 | 300 | 0 | S742 | 70 | 400 | 200 |
| S740 | 70 | 400 | 0 | S744 | 70 | 400 | 400 |

注: 表中试样名称含义举例: S524, 5 表示含水率 50%, 2 表示竖向固结应力 200 kPa, 4 表示反压水平 400 kPa。反压是指在指固结应力不变的情况下, 给试样施加的孔隙水压力, 试样加载=固结应力+反压。因此 S524 的竖向加载水平为 400+200=600 kPa。而试样最终有效应力=固结应力=200 kPa。

2 试验成果与分析

2.1 一维固结条件下的次固结特性及影响因素分析

图2表示了12个不设定反压水平的试样在不同竖向固结应力水平下固结时, 竖向变形随有效应力增加而变化的曲线, 为便于各样对比, 只截取了各试样具有相同有效应力状态, 即竖向有效应力状态达到 100 kPa 前的各时刻的沉降曲线。若认为土体在主固结阶段中的沉降仅取决于有效应力, 则图2中各固结压力水平下的曲线应重合, 因为其有效应力相同, 同为 0~100 kPa。但各固结压力水平下的曲线并不重合, 说明

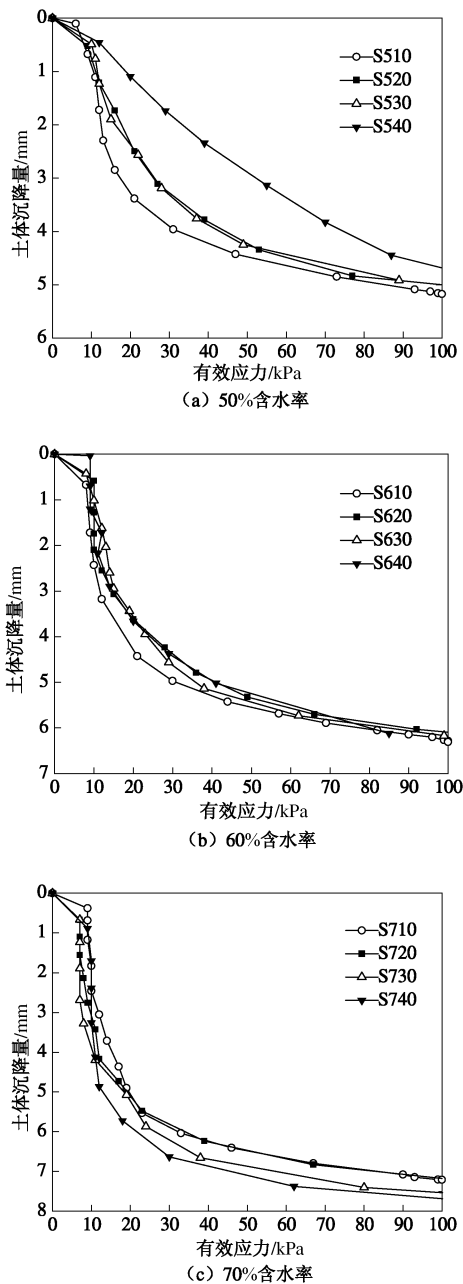


图2 各含水率下即时沉降与有效应力关系曲线

Fig. 2 Relationship between settlement and effective stresses under different moisture contents

在主固结阶段中, 土体沉降并非仅取决于有效应力, 还受其它因素影响。而在不同固结应力下, 土体有效应力达到 100 kPa 历时并不一致, 图中各曲线存在差异, 是由于有效应力作用时间不同所致, 由此表明, 土体沉降依赖于时间, 即存在次固结沉降, 这一结论也被许多研究者所证实^[10-11]。而具体到各固结曲线沉降的差异变化随固结应力变化的特征, 对比图2中的沉降-有效应力曲线可见, 同含水率下的各试样沉降差异随初始固结应力水平基本呈单调规律, 但各含水率之间, 此单调规律的表征却并不一致。

对 50% 含水率的试样, 固结应力水平越大, 其在固结过程中, 进入相同有效应力状态时的沉降越小。例如在同为 50 kPa 的竖向有效应力时刻, 试样 S510、S520、S530、S540 沉降依次为 4.4777, 4.3271, 4.2584, 2.8974 mm。此前, 很多研究者关注主固结沉降后的次固结开展, 明确提出次固结与固结应力持续的时间有关^[1-2], 这一结论亦可被用于此间主固结阶段同有效应力水平中沉降开展差异的解释——即固结应力水平越大, 其固结过程中产生相同有效应力的历时越短, 换言之, 在相同时间内, 不同固结应力真正转化为相等有效应力的程度不同, 进而造成了上述试样在相同有效应力时刻次固结沉降开展差异。

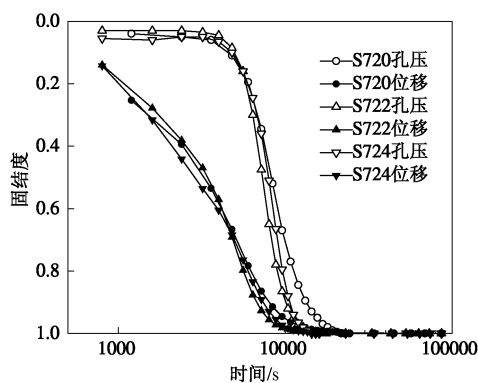
然而这种规律, 在含水率提高以后, 却逐渐消失, 甚至出现反向变化特征。由图2(b)可见, 当含水率提高到 60% 时, 虽仍是高固结应力水平试样在相同有效应力时刻产生的沉降为小, 但各曲线间差异明显减弱; 而由图2(c)可见, 当含水率提高到 70% 时, 反是固结应力水平高的试样在相同有效应力时刻产生沉降更大。理论上有效应力持续时间对次固结增长的影响总是积极的, 高含水率下出现沉降量的反向变化规律, 说明次固结还受其它因素影响。

从表观上看, 一方面, 其它应力条件不变情况下, 上述试样组条件差异, 主要来自土体含水率增加。由于含水率早已超过液限, 增加水都应为自由水, 含水率提高, 意味着显著提高了同体积土体中的孔压势, 孔压势越高, 孔隙水更容易固结排出; 另一方面, 在相同有效应力时刻, 竖向固结应力水平越高, 意味着此时的孔隙水压力亦越高, 亦会增加土体中的孔压势, 在不同的有效应力时刻, 土体的渗透性会随着有效应力而改变, 对于黏性土, 其渗透系数并不恒定, 与外界的水力坡降有关, 土体孔压势的提高, 土体的渗透性也会增大, 综合此两方面分析, 笔者认为土体次固结发展程度, 还应与加载过程中的孔压势有关, 当有效应力水平一致时, 孔压势越大, 越容易发生次固结, 且当含水率超过液限时此影响更为显著。

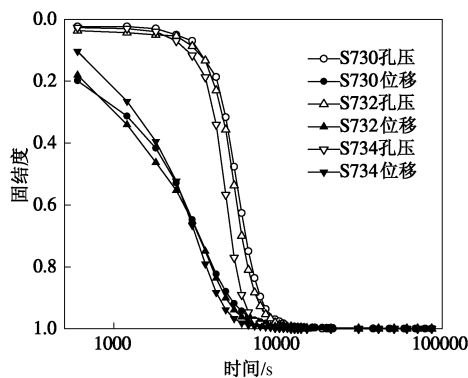
表 2 固结试验各试样最终沉降特征表

Table 2 Final settlements of samples in consolidation tests

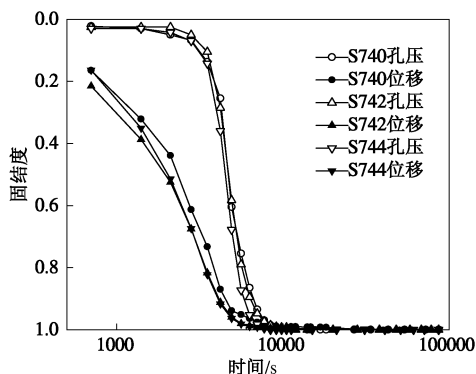
| 试样名称 | 最终沉降值 /mm | 孔压消散绝对时间/s | 95%位移固结度时间/s | 试样名称 | 最终沉降值/mm | 孔压消散绝对时间/s | 95%位移固结度时间/s |
|------|-----------|------------|--------------|------|----------|------------|--------------|
| S520 | 5.7591 | 15400 | 6100 | S720 | 7.9450 | 21000 | 10000 |
| S524 | 5.8022 | 14000 | 5700 | S724 | 8.0765 | 16000 | 8500 |
| S530 | 6.1297 | 14000 | 4000 | S730 | 8.5877 | 17000 | 6300 |
| S534 | 6.2217 | 13700 | 3600 | S734 | 8.6461 | 12000 | 5100 |
| S540 | 6.4381 | 11300 | 4500 | S740 | 8.9388 | 13900 | 3500 |
| S544 | 6.4791 | 9500 | 4200 | S744 | 8.9189 | 9300 | 2600 |



(a) 200 kPa 竖向固结应力水平下



(b) 300 kPa 竖向固结应力水平下



(c) 400 kPa 竖向固结应力水平下

图 3 70% 含水率试样在不同反压下的固结度曲线

Fig. 3 Consolidation degree curves of samples with moisture content of 70% at different back pressure levels

为进一步确认孔压势对次固结发展的促进作用,

笔者进行了保持竖向固结应力水平不变, 增加固结中恒定孔压水平的试验, 即如表 1 所示的增大初始反压水平至 200, 400 kPa 的 S522~S544 以及 S722~S744 试验。表 2 列出了这些施加反压水平试样的固结完成时间和沉降开展情况。首先由表可知, 只要试样的初始含水率和竖向固结应力水平相同, 则这些试样的最终稳定沉降值基本一致。

但是, 固结完成时间却在不同含水率下, 因反压条件的不同而呈现明显的差异。对含水率为 70% 的试样而言, 其初始反压值越大, 固结完成时间有显著提前 (如表 2 和图 3 所示), 例如反压水平在 400 kPa 的试样 S724、S734、S744, 95% 位移固结度完成时刻, 比之反压为 0 的试样 S720、S730 和 S740 分别提前了约 1500, 1200 和 900 s。而对含水率为 50% 的试样, 不同反压值下固结完成时间的差异却明显变小 (如表 2 和图 3 所示)。例如 S524、S534、S544 相比于 S520、S530、S540 只提前了约 400, 400 和 300 s。从主固结计算理论层面分析, 恒定孔压值并不影响固结度, 而试验观测到沉降完成时间提前而沉降量不变的现象, 笔者认为可有如下解释: 当土体含水率较高, 且已远超液限时, 孔压势促进了次固结的增长。而主固结阶段的主、次固结沉降总量在一定竖向固结应力水平下是基本稳定的, 因此次固结量增加的同时, 主固结沉降量就会相应减少, 并使主固结完成时间提前。由此表明, 土体次固结沉降受有效应力持续时间和孔压势联合影响, 土体含水率为 50% 时, 有效应力持续时间对次固结沉降的影响起主导作用; 而土体含水率为 70% 时, 孔压势对次固结沉降的影响起主导作用。这种影响, 甚至会间接造成对主固结沉降的影响。

2.2 一维固结中国结度标准的评价差异与问题分析

简化的太沙基一维固结理论中, 假设土体压缩模量为常数, 可得孔压和位移固结度表述一致的结论。

然而从图 4 所分别绘制的不同竖向固结应力条件下, 位移和孔压固结度随时间的发展关系可见, 孔压固结度与位移固结度明显存在差异。同固结应力水平

下，位移固结度的完成明显提前于孔压固结度，特别在固结度达到90%以前。

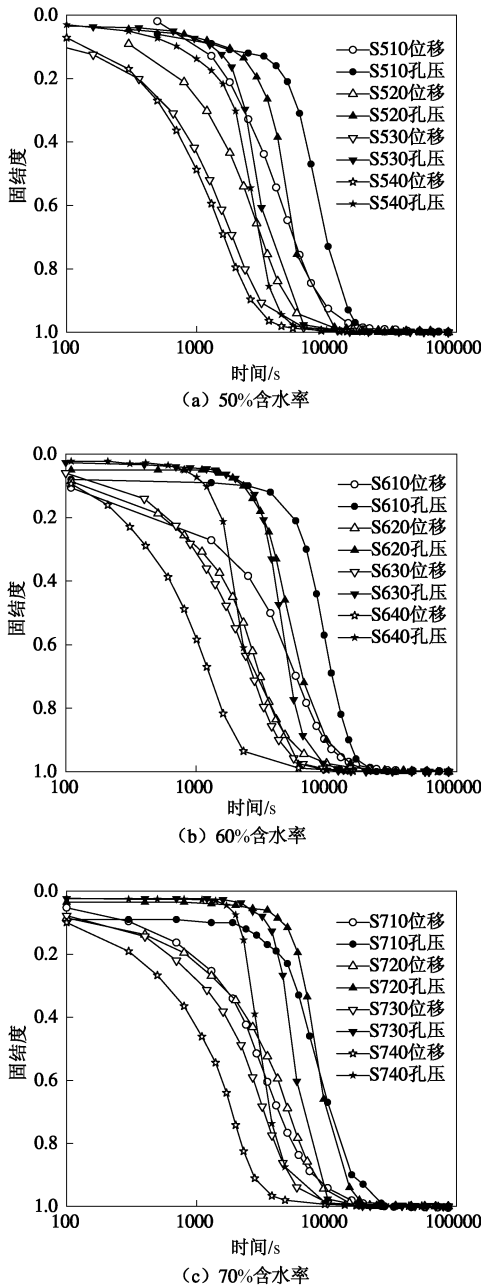


图4 各含水率试样位移和孔压固结度曲线

Fig. 4 Consolidation degree curves of deformation and pore pressure of samples with different moisture contents

一般认为实际问题中土体压缩模量随有效应力的增加而增加(即应力应变关系的非线性),会造成土体主固结计算时,孔压固结度和位移固结度的不一致。但是在图3中显示通过施加不同的反压水平且具有相同的固结应力(使土体在固结过程中有效应力保持不变),土体的固结时间就会发生改变,这并非土体变形非线性即压缩模量非常数所能解释的,而是因为土体次固结的存在,而2.1节中也说明,随着含水率的提

高,次固结的特性会加剧。因此对于超液限黏土而言,其次固结的开展,也必然会引起正常固结过程中,位移和孔压两个固结度的开展差异。可以说高含水率下,主固结前期中次固结的同步大量开展,更是促成位移较之孔压提前稳定的重要原因。

3 结论

本文通过超液限高含水率的温州滨海吹填土的一维固结试验,研究了土体在主固结阶段的主、次固结特性,得到以下结论:

(1) 黏土次固结在主固结阶段便已发生,特别是超液限的高含水率吹填土,由于孔压势较高,其主固结阶段的次固结发展更为明显。

(2) 超液限吹填黏土的次固结特性受有效应力持续时间和孔压势联合影响。含水率接近土体液限时,有效应力持续时间对于次固结开展起主导作用;含水率远超土体液限时,孔压势对次固结开展起主导作用。

(3) 超液限吹填黏土的孔压和位移固结度曲线都受次固结影响,但影响程度不同,是造成两种固结度曲线差异的重要因素,且位移固结度曲线明显体现了主、次固结的耦合。

参考文献:

[1] 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 Xiang-juan, YIN Zong-ze, DONG Wei-jun. Influence of load on secondary consolidation deformation of soft soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(6): 913 - 916. (in Chinese))

[2] 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]. 岩土力学, 2002, 23(5): 536 - 540. (LIAO Hong-jian, SU Li-jun, SHIRAKO Hiroaki, et al. Research on influence of secondary consolidation on compression time curve[J]. Rock and Soil Mechanics, 2002, 23(5): 536 - 540. (in Chinese))

[3] 陈晓平, 周秋娟, 朱鸿鹄, 等. 软土蠕变固结特性研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(增刊): 1 - 10. (CHEN Xiao-ping, ZHOU Qiu-juan, ZHU Hong-hu, et al. Research on creep and consolidation characteristics of soft soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(S0): 1 - 10. (in Chinese))

[4] MESRI G, AJLOUNI M A, FENG T W, et al. Surcharging of soft ground to reduce secondary settlement[C]// LEE C C, LAU C K, NG C W W, et al. Proc 3rd Int Conf on Soft Soil

- Engineering. Hong Kong: Balkema, 2001: 55 - 65.
- [5] MESRI G, STARK T D, AJLOUNI M A, et al. Secondary compression of peat with or without surcharging[J]. Geotechnical Engineering, ASCE, 1997, **123**(5): 411 - 421.
- [6] MITCHELL J K. Fundamentals of soil behavior[M]. New York: Wiley, 1976.
- [7] BURLAND J B. On the compressibility and shear strength of natural clay[J]. Géotechnique, 1990, **40**(3): 329 - 378.
- [8] 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 Zong-ze, ZHANG Hai-bo, ZHU Jun-gao, et al. Secondary consolidation of soft soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, **25**(5): 521 - 526. (in Chinese))
- [9] 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 Zhi-gang, ZHU Jun-gao. Experimental study on secondary consolidation behavior of soft soils[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009, **40**(5): 583 - 58. (in Chinese))
- [10] WAHLS H E, Analysis of primary and secondary consolidation[J]. Discussions, 1962, ASCE, **88**(SM6) : 207 - 231.
- [11] ROBINSON R G A Study on the beginning of Secondary Compression of soils[J]. Journal of Testing and Evaluation, 2003, **31**(5): 388 - 397.

(本文责编 黄贤沙)