

文章编号: 1000-7598-(2006) 03-0404-05

软土次固结特性试验研究

周秋娟, 陈晓平

(暨南大学 土木工程系, 广州 510632)

摘 要: 对广州南沙原状软土进行了一系列的固结试验, 探讨了应力历史、加荷比、超载预压对软土次固结的影响。试验结果表明: 软土的主次固结的划分与加荷比有关, 加荷比对次固结系数 C_α 也有影响; 次固结系数主要受到先期固结压力 p_c 的影响, 当 $p < p_c$ 或 $p > p_c$ 时, 次固结系数表现出不同的变化规律; 经预压处理后土样的次固结系数与压缩指数 C_c 之比近似为一常数: $C_\alpha/C_c \approx 0.03$, 试验成果所揭示的次固结特性对先期固结压力的依赖, 为降低地基工后沉降提供了明确的思路。

关 键 词: 次固结; 固结; 先期固结压力

中图分类号: TU 411

文献标识码: A

Test study on properties of secondary consolidation of soft soil

ZHOU Qiu-juan, CHEN Xiao-ping

(Department of Civil Engineering, Jinan University, Guangzhou 510632, China)

Abstract: Based on a series of consolidation tests for undisturbed samples in Guangzhou Nansha, the influence of stress history, load ratios and overload pre-pressure on secondary consolidation properties has been researched. The results show that the separation of primary consolidation and secondary consolidation is related to load ratios, which effect to secondary consolidation ratio C_α also. Secondary consolidation was mainly affected by preconsolidation pressure p_c . As $p < p_c$ or $p > p_c$, C_α presents different regularities. After preloading, the secondary consolidation ratio C_α and compression index C_c is a constant: $C_\alpha/C_c \approx 0.03$. The test results indicate that character of secondary consolidation depends on preconsolidation pressure, which provides a perspicuity idea for reduce settlement after construction.

Key words: secondary consolidation; consolidation; preconsolidation pressure

1 引 言

土的固结是指土体受外力作用, 内部应力变化引起体积变化, 同时有孔隙水排出的压密过程^[1], 一般分为主固结和次固结。主固结是指孔隙水消散土体固结的过程; 而次固结是指由土骨架蠕变变形产生的固结变形, 也就是当超孔隙水压力消散后, 在有效应力基本稳定的条件下, 因土粒表面的结合水膜蠕变及土粒结构重新排列等引起的较为缓慢的变形。关于次固结的形成机理尚未形成统一的认识。泰勒等 (1940 年) 提出: 固结试验中的次固结压缩实际上是黏土结构的塑性调整^[2]。陈宗基 (1958 年) 则认为, 造成次固结变形的时间效应的机械作用有两个主要过程: 一是因剪应力而产生的滞留和因静水压力而产生的体积蠕变; 二是在这两个过程中产

生的土骨架硬化^[3]。近几十年来, 由于软土次固结沉降引起的工程问题日益突出, 对次固结的研究就越来越受到重视, 很多学者对次固结的影响因素做了大量研究: Bjerrum (1972 年) 等^[4]认为, 次固结系数与先期固结压力有关, 即 p_c 值愈高, 次固结作用愈大; 而 Mesri 和 Godiewski (1977 年)、Mesri 和 Castro (1987 年) 等^[5]则认为, 次固结系数与荷载的加荷比无关, 仅取决于最终固结压力; Nash 等人^[6]研究弱超固结土, 发现随着固结压力的增大, 次固结系数呈现先增大后减小的规律; 殷宗泽等人^[7]则认为, 当荷载小于先期固结压力时, 次压缩与荷载有关; 当荷载大于前期固结压力时, 次压缩与荷载无关。本文在综合已有研究成果的基础上, 重点探讨了各种加荷过程对次固结特性的影响以及相应的次固结系数的分布规律。

收稿日期: 2004-12-06

修改稿收到日期: 2005-03-09

基金项目: 广东省自然科学基金项目资助 (No. 021145); 广东省科技计划项目 (No. 2004B32801003); 国务院侨办重点学科资助项目。

作者简介: 周秋娟, 女, 1981 年生, 硕士研究生, 从事软土时效特性的研究工作。E-mail: qjzhou2@126.com

2 基本试验方法

2.1 土的基本物理特性

试验用的原状土样取自珠江入海口处的南沙新垦。土的基本物理性质指标如表1所示。

根据土样的外观特点可知, 该地区的软土在地

表下 6~8 m 范围内为淤泥混砂层, 局部区域甚至形成“千层糕”剖面, 有些土样中还混有贝壳等杂质。表1数据表明, 软土层天然含水率大, 孔隙比在 0.87~2.00 之间, 间接反映了该地区土压缩性大、强度低的特点。

表1 土样基本物理性质指标
Table 1 Basic physical parameters of soil samples

土样编号	取样深度 / m	含水率 w / %	土粒比重 G_s	密度 ρ / $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	孔隙比 e	液限 ω_L / %	塑限 ω_p / %	液限指数 I_L	塑性指数 I_p	土样描述
1	6.4~6.6	63.26	—	1.73	1.47	—	—	—	—	灰黑淤泥, 多粉砂
2	6.6~6.8	50.24	2.62	1.75	1.25	27.1	11.4	1.43	15.7	灰黑淤泥, 多粉砂
3	6.8~7.0	75.48	2.64	1.53	2.00	44.3	19.0	1.08	25.3	灰黑淤泥, 较少砂
4	6.6~6.8	48.71	2.62	1.77	1.20	27.1	11.4	1.43	15.7	灰黑淤泥, 多粉砂
5	7.6~7.8	32.76	2.59	1.84	0.87	32.2	13.1	1.05	19.1	灰黑淤泥, 多粉砂
6	7.6~7.8	44.63	2.59	1.75	1.14	32.2	13.1	1.05	19.1	灰黑淤泥, 多粉砂

2.2 一维次固结试验方法

2.2.1 不考虑预压荷载的试验方案

试验分别在 WG 型单杠杆轻便式低压固结仪上进行, 在双面排水的情况下采用多级加荷方式进行试验。土样高为 2 cm, 面积为 30 cm²。每级荷载持续时间为 3 d (其中 2 号土样的加荷时间分别为 6, 6, 3, 13 d), 试验方案如下:

(1) 1 号土样分级加荷至 12.5, 25, 50, 100, 200, 400 kPa, 加荷比 $\Delta p/p=1$ 。

(2) 2 号土样分级加荷至 12.5, 50, 200, 400, 600 kPa, 除最后一级加荷比为 0.5 外, 加荷比 $\Delta p/p \geq 1$ 。

(3) 3 号土样分级加荷至 12.5, 50, 75, 100, 150, 200, 300, 400, 600, 700 kPa, $\Delta p/p \leq 1$ 。

(4) 4 号土样分级加荷至 50, 100, 200, 400 kPa, $\Delta p/p=1$ 。

2.2.2 考虑预压荷载的试验方案

为了研究预压荷载对软土的次固结特性的影响, 试验对两个土样进行了预压处理。试验在 WG 型单杠杆三联高压固结仪上进行, 在双面排水的情况下采用多级加荷方式进行试验。实验时对土样先预压 210 min, 然后卸荷回弹 24 h, 再进行逐级加载。5 号土样预压力为 200 kPa, 6 号土样预压力为 600 kPa。土样加荷比都为 1, 根据土样压缩稳定的观察, 每级荷载持续时间为 1 d。试验加荷方案如下:

(1) 5 号土样分级加荷至 200, 25, 50, 100, 200, 400, 800 kPa, 加荷比 $\Delta p/p=1$ 。

(2) 6 号土样分级加荷至 600, 25, 50, 100, 200, 400, 800, 1 600 kPa, $\Delta p/p=1$ 。

3 次固结特性分析

3.1 先期固结压力 p_c

先期固结压力的确定方法采用 Casagrande 作图法。典型土样的 $e-\lg p$ 曲线如图 1 所示, 可以看出 $e-\lg p$ 曲线几乎都成一条直线, 其他几个土样的 $e-\lg p$ 曲线也呈现同样规律。 $e-\lg p$ 曲线的线形说明, 此土样的先期固结压力很小, 由图上确定大约等于 50 kPa。此土样取自地下 6.4~7.0 m, 根据试验结果, 可知上覆土重 p_0 在 104~143 kPa 之间, 比先期固结压力大很多。分析原因主要是由于取土样地点正好在珠江入海口, 土层沉积年代较近, 在自重作用下还未完全固结, 属于欠固结土层。

图 2 是经过预压处理后的 $e-\lg p$ 关系曲线, 由作图法可以得到 5 号和 6 号土样的先期固结压力分别约为 200 kPa 和 600 kPa, 与试验时所加的预压相符合, 说明采用 Casagrande 作图法确定先期固结压力是合理的。

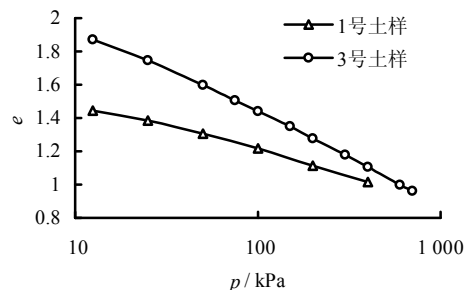


图1 不考虑预压土样的 $e-\lg p$ 关系曲线
Fig.1 $e-\lg p$ curves of non-preloaded soil samples

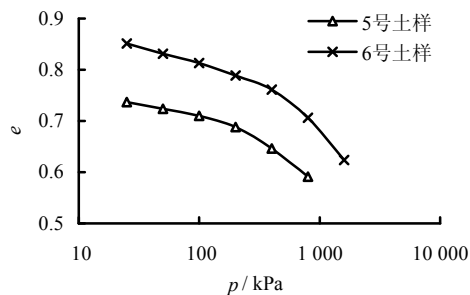


图2 考虑预压土样的 e - $\lg p$ 关系曲线
Fig.2 e - $\lg p$ curves of preloaded soil samples

3.2 主、次固结的区分界限

根据太沙基理论,变形-时间对数曲线在初始阶段为一曲线,而后会出现反弯点,因而,可由此用 Casagrande 作图法来确定主次固结的分界点。黄文熙根据进一步的研究指出^[1],只有当荷载等级较大时(例如 $\Delta p/p > 1$),才会出现太沙基所述形状的曲线,才能按 Casagrande 作图法确定主固结完成的时间。

图3~6为无预压荷载土样的 e - $\lg t$ 关系曲线。对这些试验曲线的分析可以得出:在低应力水平下,曲线有较大曲率,主固结与次固结分界明显;随着累加荷载的增加,主次固结的分界逐渐模糊,曲线近似成了直线。所以,主次固结的划分受下述3个方面因素影响:

(1) 加荷比的影响:1号土样(图3)的加荷比为1,2号土样(图4)的前3级荷载的加荷比为3,由图可以看出,加荷比大的,主次固结的分界明显,线形是典型的太沙基所描述的曲线形状,说明加荷比对主次固结的划分有一定的影响。

(2) 土体固结的影响:在累积荷载作用下,土体一般在前3,4级荷载作用下已被明显固结,所以再施加荷载时,土的压缩量减小,使得主固结部分

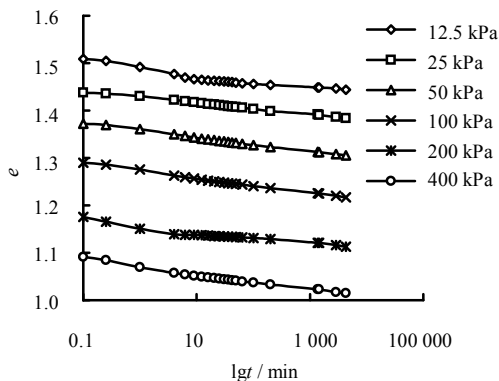


图3 1号土样 e - $\lg t$ 关系曲线
Fig.3 e - $\lg t$ curves of soil sample No.1

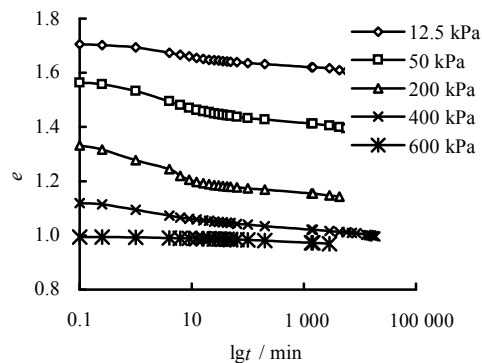


图4 2号土样 e - $\lg t$ 关系曲线
Fig.4 e - $\lg t$ curves of soil sample No.2

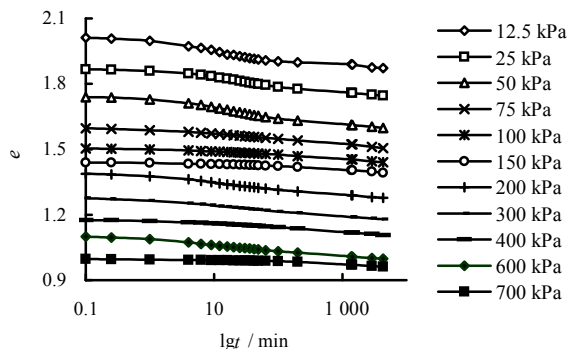


图5 3号土样 e - $\lg t$ 关系曲线
Fig.5 e - $\lg t$ curves of soil sample No.3

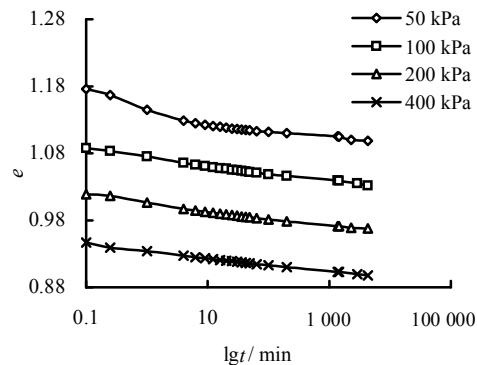


图6 4号土样 e - $\lg t$ 关系曲线
Fig.6 e - $\lg t$ curves of soil sample No.4

的变形也明显减小,此时土体的变形主要产生于次固结, e - $\lg t$ 曲线不再存在明显的反弯点。

(3) 土的渗透性降低的影响:随着土体在累积荷载下的压密,土的渗透性降低,造成孔隙水的消散随着荷载的增大,变得越来越慢,从而模糊了主次固结的界限。

由图3~6的试验成果可见,软土在排水条件下的主固结和次固结的划分是很难建立通用标准的,但可以认为,在固结压力接近先期固结压力且加荷比大于1时, e - $\lg t$ 曲线上有较明显的反弯点,此时

采用 Casagrande 法确定主次固结分界点可获得比较好的结果。

图 7、图 8 为经预压处理后土样的 e - $\lg t$ 关系曲线。由图可以看出, 当固结压力小于预压力时, e - $\lg t$ 曲线比较平缓, 即次固结系数较低, 当固结压力大于预压力时, e - $\lg t$ 曲线的坡度明显变陡, 次固结系数变化较大。

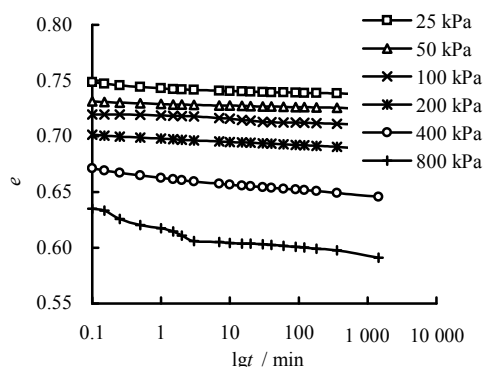


图 7 5 号土样 e - $\lg t$ 关系曲线
Fig.7 e - $\lg t$ curves of soil sample No.5

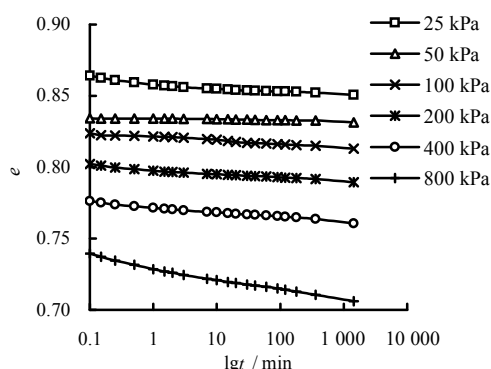


图 8 6 号土样 e - $\lg t$ 关系曲线
Fig.8 e - $\lg t$ curves of soil sample No.6

4 次固结系数变化规律

4.1 次固结系数与固结压力的关系

Buisman(1936 年)认为, 在次固结变形阶段, 变形与时间对数之间基本呈线性关系, 并在此基础上提出了次固结系数的概念。次固结系数可由土样的 e - $\lg t$ 关系曲线求得

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

式中 t_1 为相当于主固结达到 100 % 的时间; t_2 为需要计算次固结的时间。

此公式一直被广泛采用, 并被较多的研究推论为次固结系数与固结压力无关。笔者所做的试验表明, 式 (1) 仅能反映某级固结压力下次固结系数的大小, 并不能描述次固结系数与固结压力的关系。

4.1.1 无预压荷载土样

根据每一级固结压力下的 e - $\lg t$ 曲线, 可求得相应于不同固结压力下的次固结系数, 典型土样的 C_{α} - p 曲线见图 9, 其中曲线上面的数字为每级荷载的加荷比。

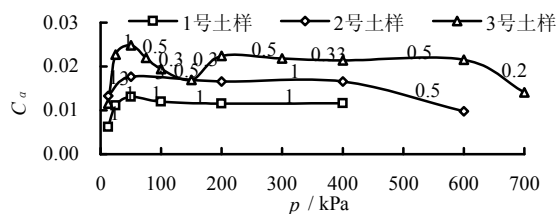


图 9 次固结系数与固结压力关系曲线
Fig.9 Curves of secondary consolidation ratio versus consolidation pressure

由图 9 中 3 个试样的 C_{α} - p 曲线可以得到一个共同的规律: 次固结系数 C_{α} 在固结压力 p 为先期固结压力 p_c 时有一峰值。同时也表明, 土样的加荷比不同, C_{α} 值的变化规律是不同的。

图中除 2 号土样的最后一级加荷比外, 1 号、2 号土样的加荷比基本上是 $\Delta p / p \geq 1$, 次固结系数 C_{α} 随固结压力 p 的变化规律为: 当 $p < p_c$ 时, C_{α} 随 p 增大而增大; 当 $p = p_c$ 时, C_{α} 达到一峰值; 当 $p > p_c$ 时, C_{α} 值略有降低, 并趋于一稳定值。 C_{α} 值出现先增大而后降低为一稳定值, 是因为当 $p < p_c$ 时, 随着 p 的增大, 土体的固结越来越明显, 次固结效应也随着明显, C_{α} 值在 $p = p_c$ 时达到一峰值。但随着 p 的进一步增大, 土在累积荷载作用下逐渐被压密, 次固结量也逐渐减少。

图中 3 号土样加荷比 $\Delta p / p \leq 1$, 此时 C_{α} 随 p 的变化规律表现为: 当 $p < p_c$ 时, C_{α} 随 p 增大而增大; 当 $p = p_c$ 时, C_{α} 达到一峰值; 当 $p > p_c$ 时, C_{α} 值有所降低, 但降低到某一值后又有所回升, 最后达到一稳定值。3 号土样与 1 号, 2 号土样的 C_{α} - p 曲线在 C_{α} 值达到峰值后与在 C_{α} 值稳定之前, 其变化规律不同的主要原因是加荷比的影响, C_{α} 值在达到峰值后随着加荷比减少, 次固结系数减小, 说明小的荷载增量不能产生明显的次固结; 随着固结压力的增大, 当加荷比变化不大时, 荷载增量会增大, 对土体的压缩明显增加, 次固结更趋于明显, 导致次固结系数增大; 之后随着累积荷载作用下, 土的压缩稳定, 次固结系数 C_{α} 趋于定值。另外, 由图可见, $p = 700$ kPa 时, 3 号土样 C_{α} 值较小, 这是因为从 $p = 600$ kPa 累积荷载到 $p = 700$ kPa 时加荷比只有 0.2, 荷载增量只有 100 kPa, 土体的压缩很不明

显,因此次固结系数较小。可见加荷比对次固结系数的影响是较大的。

2 号土样的结果还表明,当固结时间足够长,土样变形稳定后, C_α 值又将是下降趋势,此时变形已基于完成。

4.1.2 施加预压荷载土样

图 10 为经预压处理后 2 个土样的 C_α - p 曲线,从中可以得到施加预压荷载 p_p ,土样的次固结系数的变化规律如下:

(1) 当土体都处于超固结状态时, p_p 越大, C_α 值越大。随着固结压力的增大, C_α 值趋于一较小的定值。

(2) 当 p 接近 p_p 值时, C_α 值有明显增加,呈现与前述土样相同的变化规律。

(3) 在同样的固结压力下,超固结状态的 C_α 值明显小于正常固结状态时的 C_α 值。

所以,当固结压力小于预压荷载时,土体处于超固结状态,次固结系数很小,说明预压荷载可以明显降低次固结变形,为减小工后沉降提供了有效的技术路径。

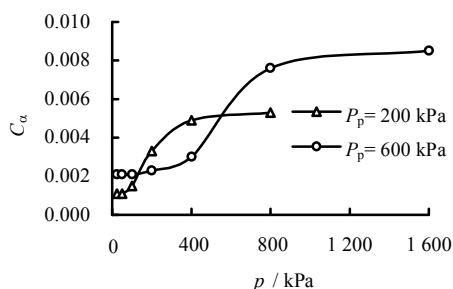


图 10 次固结系数与固结压力关系曲线

Fig.10 Curves of secondary consolidation ratio versus consolidation pressure

4.2 施加预压荷载土样的次固结系数与压缩指数的关系

如图 11 所示,预压荷载下次固结系数与压缩指数关系,呈现较好的线性关系, C_α/C_c 分别为 0.03 和 0.035,相关系数在 0.95 以上。这也符合了 Mesri 和 Godlewski^[5]指出的对于同一种原状土,次固结系数与压缩指数之比 C_α/C_c 在 0.025~0.10 之间。

5 结 论

软土的次固结特性是软土时效特性中最重要的特性之一,也是目前存在较多模糊认识的特性,本文的试验成果揭示了下述现象:

(1) 软土的主次固结的划分不仅与固结压力有关,还与加荷比、土的压缩过程和土的渗透性降低

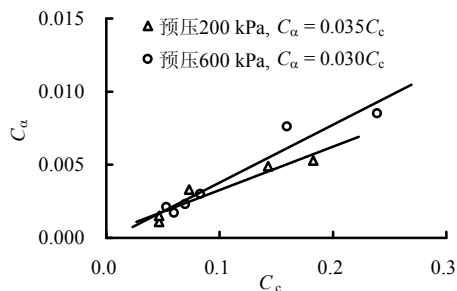


图 11 次固结系数与压缩指数关系曲线

Fig.11 Curves of secondary consolidation ratio versus compression index

等因素有关,加荷比大时,主次固结有比较明显的分界;反之不明显。

(2) 影响次固结系数的主要因素有加荷比、前期固结压力、荷载持续时间等。其中加荷比越大,对次固结系数的影响越大;当固结压力等于先期固结压力时,次固结系数有一峰值;前一级荷载持续时间越长,后一级的次固结系数将越小。

(3) 在累积荷载下,不管土样是否经过预压,如果保持一定的加荷比和荷载持续时间,土样的次固结系数都将会趋于一定值。

(4) 预压处理对消除工后沉降有利:当土体处于超固结状态时,次固结系数很小,可大大减小次固结变形量;当荷载超过预压力时,次固结系数将会急剧增大。

(5) 预压处理后土样的次固结系数与压缩指数有很好的线性关系,比例系数大约为 0.03。

致谢: 参加试验工作的还有吴起星、赖震环、朱鸿鹄、黄井武、王劲等,在此表示衷心感谢!

参 考 文 献

- [1] 黄文熙. 土的工程性质[M]. 北京: 水利电力出版社, 1983.
- [2] Taylor D W, Merchant W. A theory of day consolidation accounting for secondary compressions[J]. *Journal of Mathematics and Physics*, 1940, 19(23): 167.
- [3] 陈宗基. 固结及次固结时间效应的单维问题[J]. *土木工程学报*, 1958, 5(1): 1-3.
- [4] Bjerrum L. Embankments on soft ground, Proceedings of the specialty conference on performance of earth and earth-supported structures[J]. *Purdue University, ASCE*, 1972, 2: 1-54.
- [5] Mesri, Godlewski P M. Time and stress-compressibility interrelationship[J]. *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, 1977, 103(5): 417-430.
- [6] Nash D F T, Sills G C, Davison L R. One-dimensional consolidation testing for soft clay from Bothkennar[J]. *Geotechnique*, 1992, 42(2): 241-256.
- [7] 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.