

DOI :10.3876/j.issn.1000-1980.2009.05.020

超载预压软土的次压缩沉降估算方法

盛维高^{1,2} 李国维¹ 刘汉龙¹ 杨 华² 韩春桥²

(1. 河海大学土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210098 ;

2. 江苏省淮沭新河管理处, 江苏 淮安 223005)

摘要 : 通过室内一维次固结试验, 研究次压缩变形和预固结压力、再加荷压力之间的相关性。结果表明, 软土在超载预压后, 不论再加荷压力的大小, 再压缩过程均存在主固结过程, 进入次压缩变形的时间基本相同; 次固结系数随着再加荷压力的增大而增大, 随着预固结压力的增大而减小; 次压缩应变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; 建立的次压缩沉降计算公式既反应了软土本身性质的影响, 也反应了预固结压力和再加荷压力的影响。工程算例数据和实际工后沉降观测数据表明, 改进的次压缩沉降计算公式较之传统的次压缩沉降计算方法更为合理。

关键词 : 软土; 超载预压; 再加荷压力; 次固结系数; 次压缩沉降

中图分类号 : TU447 **文献标识码** : A **文章编号** : 1000-1980(2009)05-0596-06

在软土地基上修筑建筑物, 采用排水固结法配合超载预压法解决工后沉降问题, 是目前相对经济有效的方案^[1]。超载是临时荷载, 在完成预定计划即持续作用达到一定时间后必须卸荷, 然后进行上部结构施工, 即对于地基土层而言经历了超载、卸载、回弹和再加载的过程, 而这个过程的地基土层处于超固结状态。本文从工程需要出发, 讨论荷载稳定后的工后次压缩沉降问题。

由于对主次固结过程的区分方法、次固结的影响及评价在认识上的差异^[2-4], 导致对于工后沉降中次压缩沉降的分析方法不尽相同^[5-8]。本文采用重塑试样进行次压缩试验^[1], 研究次压缩变形和预固结压力、再加荷压力之间的相关性, 根据试验数据建立理想条件下的简化模型, 以提供解决实际工程问题的理论依据。

1 软土次固结试验

1.1 试验仪器

一维次固结试验采用南京电力自动化设备总厂生产的 GJ-1 单杠杆固结仪, 杠杆比 1:10, 所用环刀高 2 cm, 底面积 30 cm²。为了保证次固结试验结果的相对可靠性, 试验前对固结仪均进行了标定调试, 标定内容包括不同压力下仪器变形量及试样受力标定。经标定试样受力在 200 kPa 范围内, 理论压力与实际压力误差小于 $\pm 0.2\%$, 仪器精度满足本文试验要求。

1.2 重塑试样制备

试验土样采用广东汕汾高速公路典型软基段 K19+820 附近地表下 3.0~9.0 m 的淤泥, 其天然状态的物理力学指标为: 含水量 83.6%, 密度 1.49 g/cm³, 初始孔隙比 2.278。

a. 将原状淤泥加入一定量的纯净水, 反复、充分搅拌均匀、浸泡饱和, 制成高度 4~5 cm、面积能放置 16~20 个环刀的土坯;

b. 将环刀装上护环, 护环有效高度约 1.0 cm, 内径与环刀相同, 缓缓压入制备好的试样中, 削平、清洁后装入固结仪中并在容器中加入一定量的水, 以防试样失水过量;

c. 用 25 kPa 的压力预压 1 d, 然后取出加有护环的环刀, 取下护环, 将护环部分的土样削平, 逐一称取含水量及密度(若含水量或密度相差较大应剔除), 即可作为本文试验的初始土样。制备的重塑样指标含水量为 62%, 密度为 1.61 g/cm³, 初始孔隙比为 1.721。

1.3 试验加载路径

1.3.1 超载压力 400 kPa

试样 1,2,3,4 号,加载路径:25 kPa→50 kPa→100 kPa→200 kPa→300 kPa→400 kPa;每级加荷间隔时间 40 min,加载至 400 kPa 后,预压 1 d,卸载至 25 kPa,并且让试样充分回弹一天。至回弹基本稳定后,开始本文试验加载 25 kPa→50 kPa(1 号样),25 kPa→100 kPa(2 号样),25 kPa→200 kPa(3 号样),25 kPa→300 kPa(4 号样),每级荷载持续 7 d。

1.3.2 超载压力 300 kPa

试样 5,6,7,8 号,加载路径:25 kPa→50 kPa→100 kPa→200 kPa→300 kPa。卸荷后再加荷时,8 号样为 25 kPa→250 kPa,其他同 1.3.1。

1.3.2 超载压力 200 kPa

试样 9,10,11,12 号,加载路径:25 kPa→50 kPa→100 kPa→200 kPa。卸荷后再加荷时,11 号样为 25 kPa→125 kPa,12 号样为 25 kPa→150 kPa,其他同 1.3.1。

1.4 试验读数方法

当加载至 400 kPa 且稳定压缩 1 d 后,以及卸载至 25 kPa 且试样回弹 1 d 后,分别记录每组试样百分表的初始读数,用以比较在相同的固结压力下试样的压缩高度。每个试样再加载至预定荷载时,开始读数。开始的 1 h 内读数密,逐渐减少频次,24 h 后每天 2 次。试验持续 7 d 结束,结束时 24 h 百分表读数不超过 0.002。

1.5 原状土样次固结试验

原状土样取自广东省汕汾高速公路典型软基段 K19+920 断面。原状土样的次固结试验与重塑样在最大固结压力 400 kPa 情况时试验方法相同。

2 再加荷后次压缩变形特征

2.1 回弹再压缩过程的主固结时间

图 1 为软土重塑试样超载卸荷后再加荷的孔隙比时间曲线。试样经过固结压力 300 kPa 预压 24 h 后,卸荷到 25 kPa 充分回弹,再加荷到 50 kPa,100 kPa,200 kPa,250 kPa,保持恒载不变。

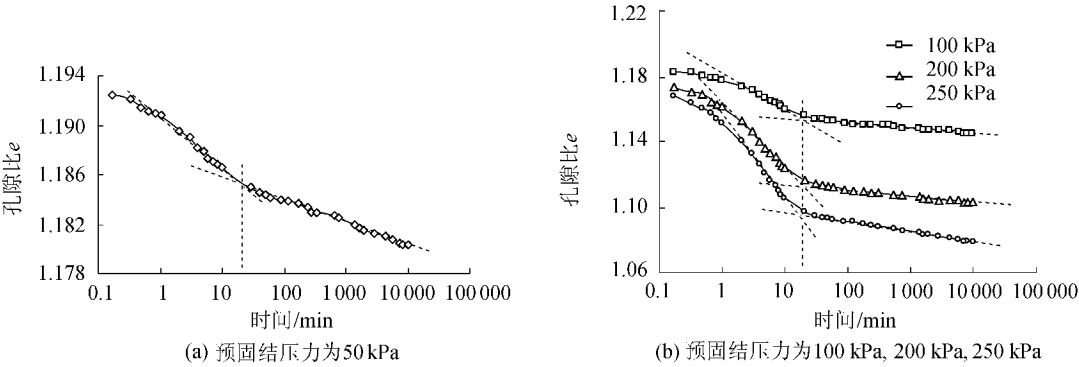


图 1 预固结压力 300 kPa 再加荷过程的次固结时间

Fig. 1 Second consolidation time of reloading process when $p_c = 300 \text{ kPa}$

通过作图法^[1]确定次压缩开始时间。图 1 显示,再加荷 50 kPa,100 kPa,200 kPa,250 kPa 下的主固结时间近似相同,和原压过程比较^[1],进入次固结阶段的时间大大提前,由 100 min 左右减小到 20 min 左右。再加荷 50 kPa 下的压缩变形时间曲线在没有放大显示时近乎直线,显示直接进入次压缩阶段的特征。该试验说明,再加荷压力较小的情况也同样存在主固结过程。这种现象符合土体的固结规律,固结过程和土层的厚度、渗透系数相关,而和固结压力大小无关。土层回弹再压缩过程的主固结时间缩短,可能在于试样的厚度减小和渗透系数的改变。

2.2 次固结系数和预固结压力、再加荷压力关系

前期固结压力被定义为土层在地质历史上所受到的最大荷载压力,为概念明确,称土样压缩试验时最大固结压力为预固结压力,用 p_c 表示。超载比^[1](OPR)为土层预固结压力与卸荷后的再加荷压力之比,即 $\alpha_{\text{OPR}} = p_c/p$ 。

表1为不同预固结压力、不同再加荷压力下的次固结系数,是以土样的应变量计算的结果^[9]。土样在超载完成主固结后,卸荷到25 kPa充分回弹,再加荷到预定的恒载水平,变形进入次压缩阶段,用直线段的次压缩变形量除以试样的初始高度20 mm作为试样的次压缩应变,再除以对应的变形时间的对数差,即得到以应变表示的次固结系数,量纲为 $[\epsilon]^{-1}$ 。

图2为再加荷后的次固结系数和预固结压力、再加荷压力的关系。图2显示,不同的预固结压力对应不同的曲线,同一预固结压力条件下,次固结系数随着再加荷压力的增大而增大,随着预固结压力的增大而减小。

表1 预固结压力、再加荷压力、次固结系数(应变)

Table 1 Values of pre-consolidation pressure, reloading pressure and coefficient of secondary consolidation(strain)

p_c/kPa	p/kPa	次固结系数 $C_a(\epsilon)/10^{-2}$
200	50	0.069 5
200	100	0.178 2
200	125	0.196 2
200	150	0.227 8
300	50	0.068 4
300	100	0.166 3
300	200	0.206 5
300	250	0.228 0
400	50	0.068 0
400	100	0.154 1
400	200	0.199 6
400	300	0.214 4

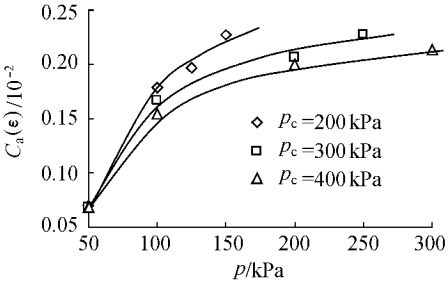


图2 再加荷后次固结系数和预固结压力、再加荷压力关系

Fig. 2 Relationship among coefficient of secondary consolidation, pre-consolidation pressure and reloading pressure after reloading

2.3 次固结应变和预固结压力、再加荷压力关系

本文试验用软土试样,超载卸荷后再加荷持续作用时间为7 d,数据处理时假定该时间发生的次压缩变形量为最终量,且试样初始高度为2 cm。从图3可以看出,在不同的预固结压力,相同再加荷压力情况下,预固结压力越大,次压缩变形量越小。

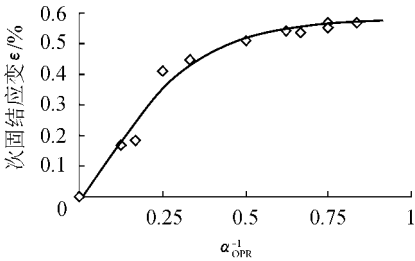


图4 再加荷后重塑样次固结 $\alpha_{OPR}^{-1} \sim \epsilon$ 关系

Fig. 4 Relationship between α_{OPR}^{-1} of remolded soil samples after reloading

式中: ϵ ——次压缩应变; α, β ——双曲线参数; α_{OPR} ——超载比。

这种现象可以解释为,再加荷后软土的次固结应变和超载比具有近似确定的函数关系。即对处于不同预固结压力和再加荷压力的软土层,只要超载比相同,则次固结应变就近似相等; $p=0, \alpha_{OPR}^{-1}=0$,说明回弹后没有再压缩过程,这种工况是存在的,相当于自然界原状土层在自重应力长期作用下形成的状态,一般原状土沉降都是趋于稳定的。

将次固结应变和超载比的双曲线关系进一步整理,如图5所示。图5显示,当超载比小于4时 $(\alpha_{OPR} \cdot \epsilon)^{-1} \sim \alpha_{OPR}^{-1}$ 关系可以用直线模拟。事实上在实际工程问题中,很少会出现超载比大于4的情况,因此,用直线

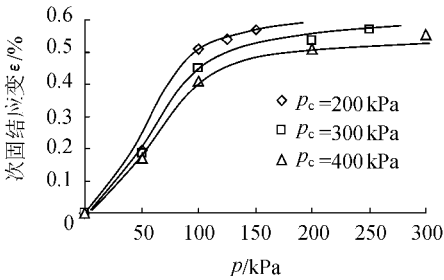


图3 再加荷后次固结应变和再加荷压力关系

Fig. 3 Relationship between ϵ and p after reloading

$$\epsilon = \frac{1}{\alpha + \beta \alpha_{OPR}} \tag{1}$$

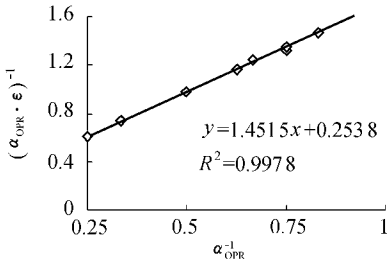


图5 修正 $\alpha_{OPR}^{-1} \sim (\alpha_{OPR} \cdot \epsilon)^{-1}$

Fig. 5 Modified relationship between $(\alpha_{OPR} \cdot \epsilon)^{-1}$ and α_{OPR}^{-1}

方法确定次固结系数和超载比的双曲线关系的特征参数,可以适用于解决一般软土地基工程问题.

将 α, β 代入式 (1),得到试验土样超载卸荷后的次固结系数方程:

$$\epsilon = \frac{1}{1.4515 + 0.2538\alpha_{OPR}} \quad (\alpha_{OPR} \leq 4.0)$$

(2)

3 软土次压缩沉降计算公式

由次固结系数定义^[9],有

$$C_a = \frac{\epsilon}{\lg t_f/t_0}$$

(3)

式中: C_a ——次固结系数; t_f ——试样次固结试验终止时间, min; t_0 ——试样主固结完成时间, min.

令 $m = \frac{t_f}{t_0}$ 称为次固结时间参数,则有

$$\epsilon = C_a \lg m$$

(4)

由式(1)(3)得

$$C_a = \frac{\epsilon}{\lg m} = \frac{1}{\lg(\alpha + \beta\alpha_{OPR})}$$

(5)

由式(4),又可以得到次固结应变为

$$\epsilon = C_a \lg \frac{t_1}{t_0} = \frac{1}{\lg(\alpha + \beta\alpha_{OPR})} \lg \frac{t_1}{t_0}$$

(6)

式中: t_1 ——实际需要考虑的次固结过程终止时间; t_0 ——实际需要考虑的次固结过程开始时间.

根据室内试验结果, $\frac{t_1}{t_0} \geq m$ 时, ϵ 增长幅度很小,基本保持恒定,因此,有:

$$\begin{cases} \epsilon = \frac{1}{\lg(\alpha + \beta\alpha_{OPR})} \lg \frac{t_1}{t_0} & t_1 < mt_0 \\ \epsilon = \frac{1}{\alpha + \beta\alpha_{OPR}} & t_1 \geq mt_0 \end{cases}$$

(7)

按照简化的分层总和法,由式(7)可得到某一计算时刻的次压缩变形量:

$$\begin{cases} s_a = \sum_{i=1}^n \frac{1}{\lg(\alpha_i + \beta_i\alpha_{OPR_i})} \lg \frac{t_1}{t_0} h_i & t_1 < mt_0 \\ s_a = \sum_{i=1}^n \frac{1}{\alpha_i + \beta_i\alpha_{OPR_i}} h_i & t_1 \geq mt_0 \end{cases}$$

(8)

式中: s_a ——次压缩变形量; h_i ——第 i 土层的厚度; n ——计算土层的分层数.

4 工程算例

以广东汕汾高速公路 K19+920 断面为研究对象,地基软土深度 21.5 m,主要为海相沉积淤泥,软土采用排水法处理 16 m,路基土层参数见表 2.设计路堤高度 3.72 m,路堤顶宽 26 m,路基底宽 48.6 m,边坡 1:1.75,设计等载高度 5.364 m,平均超载高度 2.22 m.路堤分级填土从 1999 年 12 月 26 日开始,至 2001 年 7 月底,路堤填土堆载预压持续 578 d 后卸载,至 2001 年 10 月底路面结构层施工完成,2001 年 11 月 28 日全线通车运营.

在室内进行了不同深度软土样的预固结、卸荷回弹、再压缩试验,预固结压力为 400 kPa,卸荷到 25 kPa 后回弹稳定,再加荷压力分别为 50,100,200,300 kPa.图 6 为第 1 层软土原状试样次固结应变和再加荷压力的关系曲线,其中 H 为土层取样深度,图 7 为第 1 层软土原状试样 $(\alpha_{OPR} \cdot \epsilon)^{-1} \sim \alpha_{OPR}^{-1}$ 关系曲线.

表 2 汕汾高速公路 K19+920 断面软土物理性质指标

Table 2 Physical and mechanical parameters of undisturbed soil for Shantou-Fenshuiguan Expressway section K19+920

取样深度/m	含水量 $w/\%$	密度 $\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	孔隙比 e	液限 $w_L/\%$	塑限 $w_P/\%$
4.0~6.5	91.5	1.47	2.442	58.2	37.2
11.0~13.5	94.7	1.47	2.508	59.7	38.1
15.0~16.5	83.7	1.5	2.255	31.6	20.3

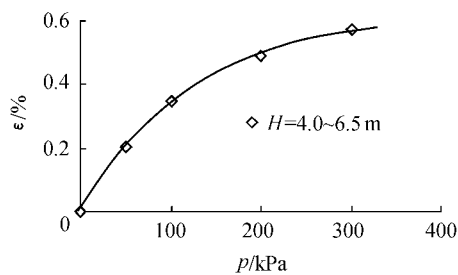


图 6 第 1 层软土次固结应变和再加荷压力关系
Fig. 6 Relationship between coefficient of secondary consolidation and reloading pressure of first soft layer

第 2、3 层软土的试验也有类似的结果,均表现出和重塑土样试验结果相同的规律.表 3 为 3 层软土的试验结果和计算参数汇总表.

K19+920 断面路面竣工时间为 2001 年 9 月底,约 60d 后开始运营.考虑到软土处理层各深度处的固结条件相近,再压缩过程的主固结时间短且相近,路面完工后沉降速率衰减快,处理层各深度点经超载卸荷再加荷后的次压缩开始时间取为路面完工后 60d,工后 5a 的时间点为路面完工后 1860d.下卧层顶部排水条件较好,和处理层底部情况相近.下卧层其他部分,路面运行后主固结过程还在继续,所发生的沉降既有主固结,也有次压缩,全部计入工后沉降中,宏观上次压缩和主固结是同时发生的^[2],近似取运营开始时间为次压缩开始时间.

汕汾公路 K19+920 断面软基未处理下卧层厚度为 5.5 m,工后 5 a 内实测总沉降量 318 mm,工后 5 a 未处理下卧层主固结沉降计算值为 220 mm,计算误差按 ±10% 考虑,下卧层主固结沉降占工后总沉降的 62%~76%,显然是工后沉降的主要因素,和文献[7]的结果相近.研究表明^[10],软土在主固结过程中的荷载变化对最终变形的影响不大,最终沉降量只和最终的有效应力相对应.

根据本文的改进方法计算得到的地基土层工后 5 a 发生的次压缩沉降量为 78 mm,加上下卧层沉降,占工后 5 a 观测累计沉降的 86%~100%,说明次压缩沉降量的计算结果具有较高的可靠性.本文方法计算得到的次压缩沉降量,实际上是超载卸荷再加荷工况的数量,占工后观测总沉降的 25%,5 a 累计约 8 cm.对于深厚软土地基,次压缩沉降也是工后沉降的重要组成部分.利用再加荷压力 50 kPa、100 kPa、200 kPa、300 kPa 情况下的次固结系数分别计算得到的次压缩沉降量为 23 mm、42 mm、61 mm、75 mm,平均值为 50 mm.可见不同再加荷压力下的次固结系数计算的次压缩沉降量得到的结果出入较大,且均小于本文方法的计算结果,说明对于超载卸荷回弹再压缩工况的软土,按照传统方法计算次压缩沉降量是不合适的.

5 结 论

软土经过超载预压、卸荷回弹后,不论再加荷压力的大小,压缩过程均存在主固结过程,进入次压缩变形的时间基本相同.次固结系数随着再加荷压力的增大而增大,随着预固结压力的增大而减小.在同一预固结压力下,次固结应变和再加荷压力近似为双曲线关系,且对应于不同的预固结压力,次固结应变和超载比之间具有规则的对应关系,可以用双曲线模拟.工程算例数据和实际工后沉降观测数据表明,使用本文改进的次压缩沉降计算公式计算的结果比传统的次压缩沉降计算方法更为合理.

本文所做的工作没有考虑次固结初始时间问题,是不完善的,有待于进一步研究.所建立的公式在计算次压缩沉降时,要根据具体工况,并结合施工过程的监测数据分析确定 t_1 .

参考文献:

[1] 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 Guo-wei,YANG Tao,YIN Zong-ze.Study of mechanism about surcharge preloading method on the soft ground of highways[J].Chinese Journal of Geotechnical

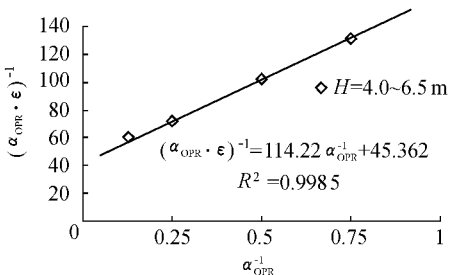


图 7 第 1 层软土 $(\alpha_{OPR} \cdot \epsilon)^{-1} \sim \alpha_{OPR}^{-1}$ 关系
Fig. 7 Relationship between $(\alpha_{OPR} \cdot \epsilon)^{-1}$ and

α_{OPR}^{-1} of first soft layer
表 3 汕汾公路 K19+920 断面软土次压缩参数

Table 3 secondary compression parameters of undisturbed soil for Shantou-Fenshuiguan Expressway section K19+920						
层厚/m	α	β	m	p/kPa	p_c/kPa	α_{OPR}
10.0	114.2	45.36	1000	138.1	177.3	1.28
4.0	96.57	62.62	1000	181.3	217.3	1.20
7.5	53.45	45.99	510	204.3	235.3	1.15

Engineering 2006 28(7) 896-901.(in Chinese))

[2] 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):21-52.(YIN Zong-ze,ZHANG Hai-bo,ZHU Jun-gao et al.Secondary consolidation of soft soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering 2003 25(5) 21-52.(in Chinese))

[3] NEWLAND P L,ALLEY B H.A study of the consolidation characteristic soft clay[J].Geotechnique,1960,10(2) 62-74.

[4] NASH D F T,SILLS G C,DAVISON L R.One-dimensional consolidation testing for soft clay from Bothkenna[J].Geotechnique,1992,42(2) 241-256.

[5] 赵维炳,艾英钵,张静.排水固结加固高速公路深厚软基工后沉降[J].水利水运工程学报,2003(1):28-33.(ZHAO Wei-bing,AI Ying-bo,ZHANG Jing. Study on post-construction settlement of thick soft roadbed improved by drainage preloading[J]. Hydro-Science and Engineering 2003(1) 28-33.(in Chinese))

[6] 张迎春,刘吉福,魏金霞.砂井地基主、次固结度黏弹性分析[J].水运工程,2003(8):20-24.(ZHANG Ying-chun,LIU Ji-fu,WEI Jin-xia. Visco-elastic analysis of the degrees of primary consolidation & secondary consolidation of sand-drained foundation[J]. Port & Waterway Engineering 2003(8) 20-24.(in Chinese))

[7] 赵维炳,刘国楠,李荣强.控制工后变形新一代软基处理技术的发展[J].土木工程学报,2004(6):79-81.(ZHAO Wei-bing,LIU Guo-nan,LI Rong-qiang.Development of new improving techniques for controlling post-construction deformation of soft soil ground [J]. China Civil Engineering Journal 2004(6) 79-81.(in Chinese))

[8] 张军辉,缪林昌,黄晓明.连云港软黏土次固结变形研究[J].水利学报,2005,36(1):116-119.(ZHANG Jun-hui,MIAO Lin-chang,HUANG Xiao-ming.Study on secondary consolidation deformation of soft clay[J]. Journal of Hydraulic Engineering 2005,36(1):116-119.(in Chinese))

[9] 殷宗泽.土体沉降与固结[M].北京:中国电力出版社,1998 34-35.

[10] 龚晓南.高速公路地基处理理论与实践[M].北京:人民交通出版社,2005 258-266.

Estimation method of secondary compression settlement for soft soil under surcharge preloading

SHENG Wei-gao^{1,2}, LI Guo-wei¹, LIU Han-long¹, YANG Hua¹, HAN Chun-qiao²

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

2. Huaishu River Bureau of Jiangsu Province, Huai'an 223005, China)

Abstract : The correlations among the secondary compression deformation , pre-consolidation pressure and reloading pressure were studied through the 1D secondary consolidation laboratory tests on soft soil . The results show that after the surcharge preloading of soft soil , the reloading process contains the primary consolidation process regardless of the magnitude of the reloading pressure , and the time to enter into the secondary consolidation deformation is basically similar . The coefficient of the second consolidation increases with the increase of the reloading pressure and decreases with the increase of the pre-consolidation pressure . There is a regular relationship between the secondary consolidation strain and the over-pressure ratio(OPR), and it can be simulated by the simplified hyperbolic model . The established secondary compression settlement formula reflects the influences of the characters of the soft soil by itself and the pre-consolidation pressure as well as the reloading pressure . The data of engineering cases and the post-construction measured data indicate that the modified secondary compression settlement formula is obviously more rational than the traditional calculation methods .

Key words : soft soil ; surcharge preloading ; reloading pressure ; coefficient of secondary consolidation ; secondary compression settlement