

软土次固结系数与压力的关系

余湘娟^{1 2} ,董卫军^{1 2} ,殷宗泽^{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 通过正常固结软黏土室内分级加载次固结试验 ,得出了荷载对次固结特性有较明显影响 ,次固结系数与压力存在一定关系的结论 .对于室内试验结果 ,采用修正的双曲线模型拟合了正常固结状态下土的次固结系数与压力之间的定量关系 ,从而提出了正常固结土次固结沉降量计算的一种修正方法 ,并以实际工程某一断面的次固结沉降计算为例 ,将该修正方法与其他几种计算方法进行了对比分析 .结果表明 ,正常固结土次固结沉降计算须考虑压力对次固结沉降的影响 .
关键词 软黏土 ;次固结系数 ;固结荷载 ;固结沉降
中图分类号 :TU471.8 文献标识码 :A 文章编号 :1000-198X(2008)01-0063-04

我国软土分布范围较广 ,沿海地区、内陆和山区都有分布 .这些地区的软土大都具有含水率高、孔隙比大、承载力低、压缩性高和流变特性显著等特点 .关于如何考虑软黏土次固结变形问题的研究 ,已取得了很多成果 .例如 :文献 [1]研究了饱和黏性土次固结系数与含水率的关系 ,认为饱和黏性土的次固结系数与含水率之间的关系基本呈线性变化 ,并建立了饱和黏性土次固结系数与含水率关系的相关公式 ;文献 [2]研究了应力水平、应力历史、加荷速率、应力比等因素对次固结系数的影响 .文献 [3-4]提出的一维流变模型 ,区别了正常固结土与超固结土的情况 .文献 [4]对软土次固结变形进行了详细分析 ,并提出了次固结沉降量的计算方法 .但对于正常固结土来讲 ,目前关于次固结沉降量的计算方法都没有考虑到固结压力对次固结的影响 ,认为次固结系数为常数 ,即次固结系数与压力无关 .文献 [5]给出了一种计算正常固结土次固结沉降量的方法 ,分析了荷载对次固结变形的影响 ,但也没有给出次固结系数与压力的定量关系 .本文通过对室内软土次固结按加载比为 1 的分级加载试验结果的分析 ,给出了荷载与次固结系数之间的定量关系 ,提出了计算次固结沉降变形的一种新方法 .

1 试验设计与成果分析

试验土样为汕揭高速公路路基的原状软土 ,采用分级加载方法 .试验仪器采用有侧限的常规高压固结仪 .为了减小温度对试验结果的影响 ,试验全部在地下室进行 ,并对每种土样同时进行平行试验 .对于汕揭高速公路路基软土土样的固结压力按加载比 1 从 50 kPa 开始逐级施加到 800 kPa .试验按JTJ051—93《公路土工试验规程》^[6]进行 .试验土样的物理性质指标如表 1 所示 .

通过软土单向室内固结试验 ,得到了一系列试验结果 ,其中汕揭高速公路路基软土桩号为 BK0 + 250 的原状土分级加载得到的时间对数与孔隙比的关系曲线如图 1 所示 .对该路基软土试样进行了常规压缩试验 ,通过卡萨格兰德经验方法得到的其前期固结压力为 60 kPa .该固结压力与其自重应力接近 ,表明土体处于正常固结状态 .

表 1 试样物理性质指标

Table 1 Physical property indexes of soil samples						
取土地点	取土深度/m	天然含水率/%	密度/(g·cm ⁻³)	初始孔隙比	塑性指数	液性指数
汕揭 K33 + 760	3.7 ~ 4.0	97	1.45	2.70	35	1.79
汕揭 BK0 + 250	3.8 ~ 4.1	89	1.47	2.55	52	1.05

根据次固结系数的定义,从图1不同压力下孔隙比和时间的半对数关系曲线中主固结完成后直线部分的斜率得到不同压力下的次固结系数.据此把次固结系数和压力的关系点绘于图2.从图2可见:当荷载较小或较大时,次固结系数均较小,而荷载在100 kPa左右时,次固结系数最大.文献[5,7]也给出了类似的结论.

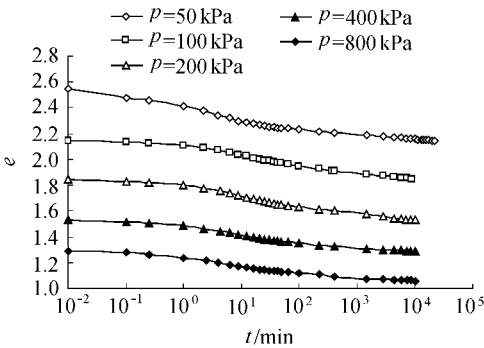


图1 次固结试验孔隙比 e 与 t 的关系

Fig.1 Curves of void ratio e and consolidation time t in secondary consolidation tests

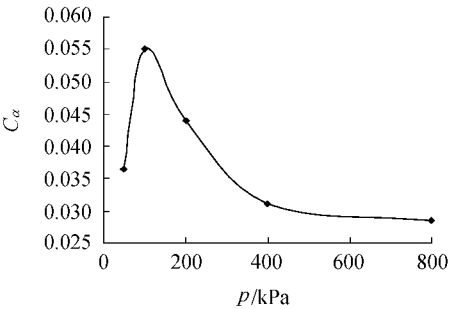


图2 次固结系数 C_α 与压力 p 的关系

Fig.2 Curve of secondary consolidation coefficient C_α and consolidation load p

2 模型的建立

试验数据分析结果表明,采用修正的双曲线模型来拟合正常固结土 $p > p_c$ (前期固结压力)时次固结系数与压力的关系是比较合理的.修正的双曲线模型为

$$C_\alpha = A + B/p \tag{1}$$

式中: C_α ——压力 p 作用下的次固结系数; A, B ——待定参数;
 p ——土体受到的固结压力, kPa. 可以利用曲线拟合的最小二乘法原理[8]将式(1)完全转化为求多元函数的极小值问题来确定参数 A, B 的值,也可以利用式(1)的变换式

$$pC_\alpha = Ap + B \tag{2}$$

求参数 A, B 的值.此时参数 A, B 的意义如图3所示,其中 A 为线性方程的斜率, B 为线性方程在纵坐标上的截距.

只要参数选择合理,双曲线模型可以较好地拟合次固结系数与压力的关系.这也符合土体的压缩变化规律,即在外荷作用下,随着压力的增加,土体越来越密实,在相同历时下的变形就越小,表现为次固结系数随着压力的增加也会越来越小.

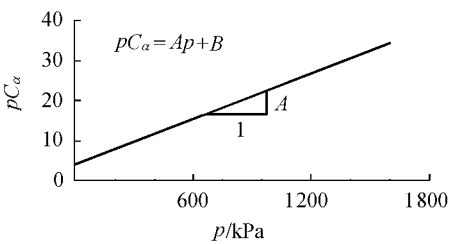


图3 pC_α 与 p 的关系

Fig.3 Curve of pC_α and p

将由式(1)得到的次固结系数代入常规计算次固结沉降公式,得

$$S_s = \frac{H}{1 + e_0} C_\alpha \lg\left(\frac{t_2}{t_1}\right) = \left(A + \frac{B}{p}\right) \frac{H}{1 + e_0} \lg\left(\frac{t_2}{t_1}\right) \tag{3}$$

式中: S_s ——次固结沉降量; H ——压缩土层厚度; t_2 ——需要计算的时间; t_1 ——主固结完成的时间; e_0 ——天然孔隙比.

式(3)即为本文提出的正常固结土次固结沉降量计算公式.

试验得出的汕揭高速公路路基正常固结软土的次固结系数与相应压力的数值关系如表2所示.

由最小二乘法计算得到的桩号为BK0+250处的软土的模型参数 $A = 0.0251, B = 3.1075$,标准差为0.0028,相关系数为0.982.由式(1)计算与试验得到的此桩号的次固结系数和压力的关系如图4所示.而桩号为K33+760处的模型参数 $A = 0.0209, B = 3.0626$,相关系数为0.995.

表2 土样的次固结系数与压力的关系
Table 2 Relationship between consolidation load and secondary consolidation coefficient of soil samples

压力/ kPa	C_α 值	
	BK0+250 断面	K33+760 断面
100	0.055	0.051
200	0.044	0.038
400	0.031	0.029
800	0.029	0.026
1600		0.021

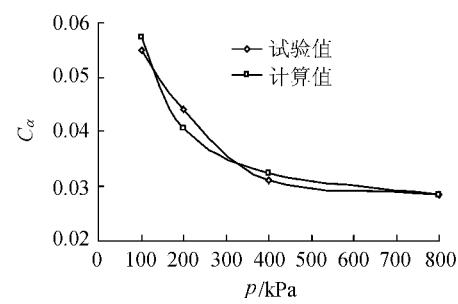


图 4 BK0+250 断面次固结系数 C_a 与 p 的关系

Fig.4 Curve of secondary consolidation coefficient C_a and consolidation load p for a highway embankment section BK0+250

3 工程应用

目前在工程中应用较多的计算方法⁹⁻¹⁰(本文称为常规方法,也叫方法 1)中所采用的次固结系数为不随压力变化的常数,即不论荷载大小,对于同一历时,其次固结变形量为常量.该方法 S_s 的计算公式为

$$S_s = \frac{H}{1 + e_0} C_a \lg\left(\frac{t_2}{t_1}\right) \tag{4}$$

文献[5]也提出了一种计算次固结沉降的方法(本文称为方法 2),即

$$S_s = -\frac{\Delta e_s}{1 + e_0} H = -\frac{H}{1 + e_0} \left[\Delta e_0 + (C_c - C_{ct}) \lg\left(\frac{p_c + \Delta p}{p_c}\right) \right] \tag{5}$$

式中: Δe_s —— $p_c + \Delta p$ 作用下 t 时间内的次固结孔隙比变化量; Δe_0 —— p_c 作用下 t 时间内的次固结孔隙比变化量; C_c —— $t = 0$ 时的压缩指数,即通常意义上的压缩指数; C_{ct} ——历时为 t 时的压缩指数, t 为次固结历时(单位为 min).

汕头至揭阳高速公路段 K33+760 断面处路面宽为 28 m,路堤高度为 3.7 m,坡比为 1:1.5.实测的荷载、沉降与时间的关系如图 5 所示.淤泥层位于 1.9~6.5 m 之间,即厚度为 4.6 m.由室内试验结果得到的主固结线的压缩指数为 0.570 1,主固结完成时间为 100 min,由卡萨格兰德法计算得出的前期固结压力约为 60 kPa,即约等于土体的自重应力,说明该土层处于正常固结状态.由试验得到的该断面的次固结系数与压力的关系如表 2 所示.100 kPa 压力荷载作用下软土的次固结系数为 0.043 5.方法 1 计算次固结沉降时采用的次固结系数为 0.043 5.不同方法计算的次固结沉降及现场实测值如表 3 所示.

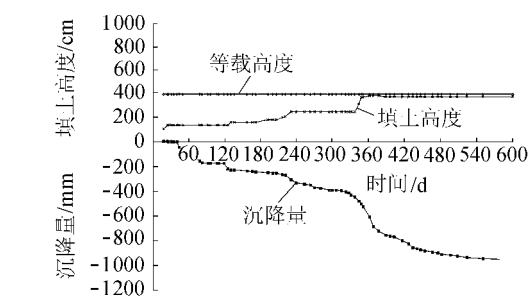


图 5 K33+760 断面荷载、沉降与时间的关系

Fig.5 Consolidation load-time curve and consolidation settlement-time curve for a highway embankment section K33+760

表 3 不同方法得出的不同历时的次固结沉降量比较

Table 3 Comparison of secondary consolidation settlement at different time obtained by different calculation methods

时间/ d	次固结沉降量/mm			
	方法 1	方法 2	现场实测	方法 3 (本文方法)
360	200.7	206.8	143.0	216.8
1800	238.5	227.2	224.0	257.6
3600	254.8	236.6	258.8	275.1
5400	264.3	241.5	279.2	285.4

分析结果表明,方法 3 与方法 1 得到的次固结沉降量有一定的差别.由本文所提出的模型可知,次固结系数随着压力的增加而减小,并且当荷载等于前期固结压力时次固结系数达到最大值,而方法 1 中的次固结系数是各级荷载下的次固结系数的平均值.因此,当压力处于前期固结压力附近时次固结系数较大,进而得到的次固结沉降量也较大.如果固结压力比较大时,次固结系数随着压力的增大而减小,当固结压力小于平均值时,此时的结论恰好相反.本文所提方法与现场实测值相比,开始几年相差较大,但随着时间的增加,次固结变形量越来越接近,15 a 后的次固结变形量只相差 2%.产生误差的主要原因是 (a) 在现场监测过程中,土体的主、次固结是同时发生的,即在主固结发生的同时,次固结也随之发生; (b) 实际工程中的加载方式是连续加载,而室内试验中的加载方式是瞬时加载,表现为土体在压缩过程中现场的初始有效应力比试验室内的大,即实际工程中的初期变形较大,进一步表现为次固结变形阶段的变形值偏小; (c) 虽然现场和试验室内都采取了分级加载的方式,但在利用本文方法计算次固结变形的过程中没有考虑分级加载后的次固结变形的叠加,这也导致了变形的偏大.但从计算结果来看,采用本文方法是可行和合理的.

4 结 语

a. 次固结计算通常不考虑固结压力的影响. 实际上, 次固结与固结压力有一定的关系. 本文给出了汕揭高速公路软土地基路段正常固结软土压力与次固结系数之间的关系, 并用双曲线模型拟合了次固结系数与压力之间的关系.

b. 通过工程实例计算对次固结沉降计算的几种方法进行了比较. 比较结果表明, 本文方法比较合理、简单和实用.

c. 本文方法考虑了荷载作用对次固结系数的影响, 其计算结果更能反映次压缩变形机理.

参考文献:

- [1] 曹玉苹. 论饱和黏性土次固结系数与含水量的关系[J]. 中国港湾建设, 2007(3) : 21-23.
- [2] 陈君享. 高速公路软土地基次固结系数影响因素研究[J]. 山西建筑, 2007, 33(18) : 276-277.
- [3] YIN Jian-hua, GRAHAM J. Elastic visco-plastic modelling of one-dimensional consolidation[J]. Geotechnique, 1996, 46(3) : 515-527.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] JTJ051—93, 公路土工试验规程[S].
- [7] 陈晓平, 朱鸿, 张枝芳, 等. 软土变形时效特性的试验研究[J]. 岩土力学与工程学报, 2005, 24(12) : 2142-2148.
- [8] 李庆扬, 王能超, 易大义. 数值分析[M]. 4 版. 北京: 清华大学出版社, 2001.
- [9] 钱家欢, 殷宗泽. 土工原理与计算[M]. 2 版. 北京: 中国水利水电出版社, 1996.
- [10] JTJ017—96, 公路软土地基路堤设计与施工技术规范[S].

Relationship between loads and secondary consolidation coefficients of soft clay soils

YU Xiang-juan^{1, 2}, DONG Wei-jun^{1, 2}, YIN Zong-ze^{1, 2}

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

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

Abstract : Laboratory secondary consolidation tests were performed on normally consolidated soft clay soils to study the relationship between consolidation loads and secondary consolidation characteristics of soils. It is shown that consolidation loads are of obvious influences on secondary consolidation characteristics. A modified hyperbolic model was used to simulate the quantitative relationship between the two factors in the normal consolidation state. Accordingly, a modified method was proposed to calculate the secondary consolidation settlement of normally consolidated soils. A case study was performed to calculate the secondary consolidation settlement of a highway embankment section in a practical project. The comparison of the modified method with other calculation methods shows that consolidation loads should be considered in secondary consolidation settlement calculation of normally consolidated soils.

Key words : soft clay soil ; secondary consolidation coefficient ; consolidation load ; consolidation settlement