

室内固结试验每级荷载合理受压时间分析

张海霞¹ 李 晖² 陈 勇³

(1. 河海大学土木工程学院 , 江苏 南京 210098 ; 2. 河海大学教务处 , 江苏 南京 210098 ;
3. 南京市水利规划设计院 , 江苏 南京 210005)

摘要 采用固结试验得到的压缩性指标计算土体固结沉降量. 研究表明 , 室内 24 h 加压的大部分时间产生的沉降为次固结沉降 , 固结沉降在 1 ~ 4 h 之内已经完成. 为了较准确地计算固结沉降量 , 建议将固结试验每级荷载加压时间由土工试验规范中规定的 24 h 缩短成 : 固结系数大于 $4 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{s}$ 的粘土和粉质粘土为 1 h , 固结系数在 $1 \times 10^{-4} \sim 4 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{s}$ 范围内的粘土为 4 h.
关键词 固结试验 ; 主固结完成时间 ; 固结系数 ; 次固结系数
中图分类号 : TU41 文献标识码 : A 文章编号 : 1000-1980(2004)01-0081-03

粘性土室内固结试验是一项常规土工试验. 我国有关标准^[1]规定 , 固结应力范围要覆盖建筑物地基自重应力与附加应力之和. 试样面积为 30 cm^2 、高 2 cm 的圆柱体. 第 1 级法向应力一般为 50 kPa , 对软土采用 25 kPa 或 12.5 kPa , 以保证试样不发生挤出现象. 加荷比一般采用 1($\Delta p_i/p_i = 1$). 每级荷载作用 24 h^[1, 2]. 试验结果采用 $e \sim p$ 曲线得到压缩系数 a_v 或采用 $e \sim \lg p$ 曲线得到压缩指数 , 从而可计算地基固结沉降量.
若 2 cm 厚的试样完成主固结需要 24 h , 按照太沙基固结理论^[3] , 一个 5 m 厚的相同土体在单面排水的条件下完成主固结需要的时间

$$t = \frac{500^2}{1^2} \times 24 = 6\,000\,000(\text{h}) = 685(\text{a})$$
 (1)

工程实践表明 , 实际上完成主固结需要的时间要短得多. 因此 , 室内试验完成主固结的时间也比 24 h 短得多. 若把该时间缩短为原来的 1/24 , 则 5 m 厚的土体完成主固结的时间为 28.5 a , 与一般工程经验更吻合.

1 固结试验时完成主固结所需要的时间

对于双面排水的试样 , 按照太沙基固结理论 , 经过时间 t 后土层达到的固结度 , 如公式(2)所示.

$$U = 1 - \sum_{m=1}^{\infty} \frac{2}{M^2} \exp(-M^2 T_v)$$
 (2)

其中 $T_v = c_v t / \bar{H}^2$ (3)

$M = (2m - 1)/2$ (4)

式中 : U ——试样在 t 时刻的平均固结度 ; T_v ——时间因素 ; $\bar{H}$ ——最大排水距离 , 对于初始厚度 2 cm 的试样 , 在双面排水时 $\bar{H} \approx 1 \text{ cm}$; c_v ——固结系数 ; m ——自然数.

由式(2)可以得到给定固结度时的时间因素 T_v , 代入式(3)可以得到该固结度对应的时间. 对于室内试样 , 计算结果见表 1. 由表 1 可见 , 对于常见土体 , 完成主固结 (固结度达到 99%) 需要的时间不超过 4 h , 粉土和粉质粘土少于 1 h. 因此 , 室内固结试验

表 1 不同土体试样完成给定固结度所需要的时间
Table 1 Consolidation time for different soil samples

土类	固结系数 ($\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)	完成 90% 固结度 需要的时间/min	完成 99% 固结度 需要的时间/min
粘 土	1×10^{-4}	141	252
	4.2×10^{-4}	33.7	60
粉质粘土	8.4×10^{-4}	16.8	30
	1.26×10^{-3}	11.2	20
粉 土	2.52×10^{-3}	5.6	10
	5.04×10^{-3}	2.8	5

注 : 试样高度为 2 cm , $U = 90\%$ 时 , $T_v = 0.848$; $U = 99\%$ 时 , $T_v = 1.507$.

每级荷载稳定的时间控制在 1 h 对于大多数土体比 24 h 更合适.对于粘粒含量很高的重粘土,固结系数在 $1 \times 10^{-4} \sim 4 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{s}$ 范围内时,完成主固结时间为 4 h,仅对特殊的粘土(如蒙脱石含量很高的粘土),当固结系数小于 $1 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{s}$ 时,需要更长的固结时间.

2 讨论固结试验加荷时间的意义

2.1 有利于正确计算地基沉降

现在已有共识,地基沉降包括初始沉降、固结沉降和次固结沉降 3 个组成部分^[3].对于饱和软土地基,初始沉降是加荷瞬时的不排水弹性变形,可以用弹性力学公式计算.次固结沉降是在有效应力不变(或固结沉降完成后,超静孔隙水应力为零)的条件下,由于土体骨架的流变特性产生的沉降.通常次固结沉降从固结沉降完成后的时刻开始计算.固结沉降是由于土体在外荷载作用下,孔隙水应力消散,有效应力增加而产生的沉降.因此,若在获得计算固结沉降的参数中(压缩系数或压缩指数)包含了次固结沉降,则会夸大固结沉降量.3 项累加后的结果是夸大了总沉降量.这是预测软土地基沉降大多数情况下比实际沉降大的主要原因之一.同时,夸大固结沉降还可能产生低估次固结沉降的问题.如把一部分次固结沉降划归固结沉降后,认为次固结沉降占总沉降比例降低,从而低估工后沉降(主要由次固结沉降引起).

2.2 有利于缩短固结试验时间

对于粘性土,土工试验规范^[1,2]规定固结试验每级荷载稳定时间为 24 h.实际上绝大部分土体在 1 h 之内固结沉降已完成 99% 以上,因此固结试验每级荷载合理的稳压时间对绝大多数的粘土应该是 1 h.这样大大缩短了固结试验时间,获得的结果更符合实际.

2.3 应该更正现有规范有关快速法的计算公式

土工试验规程^[2]中介绍了一种快速固结试验方法,其中心思想是:从第 1 级荷载到倒数第 2 级荷载,每级荷载加载时间为 1 h,记录每级荷载的固结沉降量 S_{i1} ,最后 1 级荷载记录加荷 1 h 的沉降量 S_{n1} ,然后保持该荷载,继续压缩到 24 h,记录该级荷载 24 h 的压缩量 S_n ,用式(5)计算被称之为修正系数的参数 K :

$$K = S_n/S_{n1}$$

(5)

然后对于以前每级压力的沉降量用式(6)修正后作为该级压力作用下的固结沉降:

$$S_i = S_{i1}K$$

(6)

式中: S_i —第 i 级压力作用下试样的固结沉降量; S_{i1} ——第 i 级法向应力作用下,试样在该应力作用 1 h 时的沉降量.

式(6)严重高估了试样的固结沉降,这是因为(a)该式假设固结沉降需要 24 h 才能完成(b)前面的 $i-1$ 级荷载作用下,即使固结沉降没有完成,在第 i 级和以后的荷载作用时将继续完成,因此,后面荷载作用下的沉降包含了前面荷载作用的部分沉降.因此公式(6)严重放大了每级荷载作用的固结沉降,越是后面的荷载,放大部分的比例越大.

基于以上分析,规范中所谓的快速法应该是更合适的固结试验方法,所得固结沉降量不用再进行修正.最后一级荷载可以作用 24 h 或更长一些,用于获得该土的次固结系数,从而计算次固结沉降.

3 固结试验成果分析

选择某高速公路地基原状试样进行室内固结试验,采用时间对数法获得固结压力为 100 kPa、200 kPa 和 400 kPa 时 $U = 50\%$ 的固结时间, $U = 100\%$ 的孔隙比和 $t = 24 \text{ h}$ 的孔隙比、压缩系数、固结系数和次固结系数等参数,结果见表 2.该土样的固结试验曲线见图 1.由图 1 可见,24 h 内发生的沉降有一部分是试样主固结完

表 2 原状土固结试验结果

Table 2 Result of consolidation test for a natural soil

固结应力 /kPa	$U = 100\%$ 的 孔隙比	压缩 24 h 的 孔隙比	$U = 50\%$ 需要 的时间/min	$U = 100\%$ 需要 的时间/min	固结系数 ($\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)	次固结 系数
0	1.338	1.338				
100	1.228	1.223	6.5	66	4.78×10^{-4}	3.73×10^{-3}
200	1.137	1.118	6.3	58	4.38×10^{-4}	1.36×10^{-2}
400	1.007	0.983	6.1	52	4.11×10^{-4}	1.66×10^{-2}

注:由 $U = 100\%$ 对应的孔隙比得到的压缩系数 $a_{e100-200} = 0.91 \text{ MPa}^{-1}$,由 $t = 24 \text{ h}$ 对应的孔隙比得到的压缩系数 $a_{e100-200} = 1.05 \text{ MPa}^{-1}$.

成后发生的次固结沉降.按照次固结系数的定义:

$$a_{\alpha}=-\Delta e/\lg \frac{t}{t_{100}} \tag{7}$$

$$\Delta e=e_t-e_{100} \tag{8}$$

式中: t_{100} 、 e_{100} ——主固结完成的时间和对应的孔隙比; e_t ——主固结完成后某一时刻 t 对应的孔隙比.

4 结 语

- a. 通过分析室内固结试验,指出对于大部分土样只需 1 h 左右即完成固结沉降过程.因此固结试验每级荷载作用时间取大约 1 h 更合理,而不应该是规范建议的 24 h.对于固结系数极低的粘土($C_v=1\times 10^{-4}\text{cm}^2/\text{s}$),完成主固结时间大约仅为 4 h.
- b. 实际试验结果表明,24 h 固结时间内试样已经发生了明显的次固结沉降,本文计算了该试样的次固结系数.

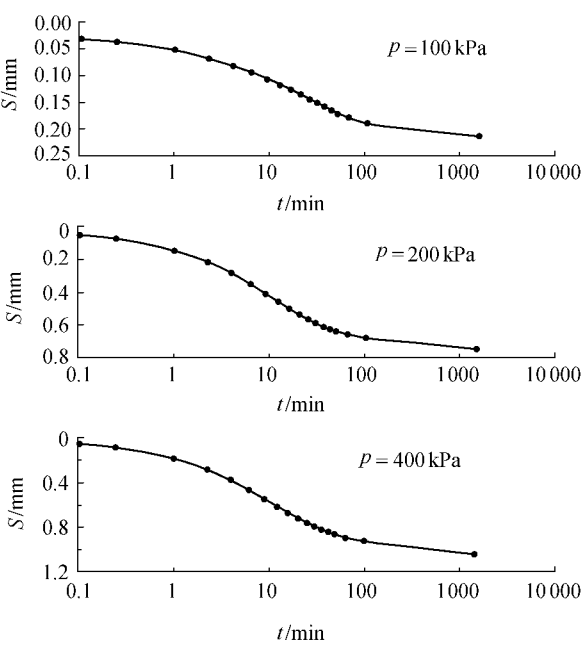


图 1 原状土固结试验沉降量与时间关系曲线
Fig.1 Consolidation procedure of a natural soil

参考文献:

[1] GB/T50123—1999 土工试验方法标准[S].
[2] SD128—84 土工试验规程[S].
[3] 钱家欢,殷宗泽.土工原理与计算[M].第2版.北京:水利电力出版社,1994.28—33.

Reasonable loading time for each stage of loading
in consolidation tests

ZHANG Hai-xia¹, LI Hui², CHEN Yong³

(1. College of Civil Engineering, Hohai Univ., Nanjing 210098, China;

2. Dean's Office, Hohai Univ., Nanjing 210098, China;

3. Nanjing Water Conservancy Planning and Design Institute, Nanjing 210005, China)

Abstract: The consolidation settlement of foundations is calculated with the compression index (or compressibility coefficient). According to the geotechnical specifications for consolidation tests in China, the loading of each stage should last 24 hours, but the research shows that the consolidation settlement has been finished in the early 1~4 hours for most clay, and during the rest of time, the settlement belongs to the secondary consolidation settlement. For accurate calculation of the consolidation settlement, it is suggested that the loading time of each stage should be reduced, i.e. 1 hour for clay and silty clay with a consolidation coefficient larger than $4\times 10^{-4}\text{cm}^2/\text{s}$, and 4 hours for clay with a consolidation coefficient in the range of $1\times 10^{-4}\text{cm}^2/\text{s}\sim 4\times 10^{-4}\text{cm}^2/\text{s}$.

Key words: consolidation test; finish time of main consolidation; consolidation coefficient; secondary consolidation coefficient