

不同压力作用下重塑黄土的固结特性

冯 望¹, 李顺群^{1,2}, 高凌霞³

(1. 天津城市建设学院 土木工程系, 天津 300384; 2. 天津市软土特性与工程环境重点实验室, 天津 300384;
3. 大连民族学院 土木建筑工程学院, 辽宁 大连 116600)

摘要: 一般认为, 固结系数随固结压力的增大而绝对减小, 但这种认识在特定条件下具有一定的片面性。基于时间对数法和时间平方根法, 对重塑黄土常规固结试验结果中的固结系数、密度进行了对比研究, 并给出了结构度的概念。两种方法的计算结果表明, 重塑黄土的固结过程是一个渐变过程, 在不同压力作用下固结系数的变化呈震荡式衰减而非单调递减。土体固结系数受荷载和初始孔隙率这两个主要因素的影响, 而非只取决于荷载的大小。由时间对数法和时间平方根法计算得到的固结系数变化趋势和幅度并不完全一致。土体结构度曲线较好地反映了土体的固结特性。

关键词: 固结系数; 重塑黄土; 震荡式衰减; 密度; 孔隙率; 结构度

中图分类号: TU444

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2012)06—0005—04

Consolidation Properties of Remolded Loess under Different Pressures

FENG Wang¹, LI Shun-qun^{1,2}, GAO Ling-xia³

(1. Department of Civil Engineering, Tianjin Institute of Urban Construction, Tianjin 300384, China;

2. Tianjin Key Laboratory of Soft Soil Characteristics and Engineering Environment, Tianjin 300384, China;

3. School of Civil and Architectural Engineering, Dalian Institute of Nationalities, Dalian, Liaoning 116600, China)

Abstract: It is generally thought that the coefficient of consolidation is absolutely reduced with the increasing of consolidation pressure. To illustrate the prejudice under certain conditions, based on the time square root method and time logarithmic method, the contrast study was made on the consolidation coefficient and density of remolded loess derived from consolidation test results, and then the conception of structuredness is defined. The results from the two approaches show that the consolidation of remodeling loess is gradual, and the changing regulation of the consolidation coefficient is the concussed attenuation nor the gradual attenuation under different pressures. The major factors influencing the consolidation coefficient of remolded loess are the initial porosity and loading, not only the loading. The changing trend and magnitude of the consolidation coefficient from time square root method and time logarithmic method are not same. The curve of structuredness could better describe the consolidation properties of remolded loess.

Keywords: consolidation coefficient; remolded loess; concussed attenuation; density; porosity; structuredness

0 引言

固结系数^[1-2]是太沙基(Terzaghi)一维固结理论的一个重要参数, 直接反映土体的固结特性。固结系数既是一项重要的试验指标, 也是地基处理设计中的关键参数。因此, 固结系数的确定对合理预测地基基础沉降有着决定性意义。

当前, 确定固结系数的方法^[3-4]均是基于太沙

基的一维固结理论, 而太沙基一维固结理论有着严格的前提条件, 即① 土层是均匀的, 完全饱和的; ② 土粒和水不可压缩; ③ 水的渗出和土层的压缩只沿一个方向(竖向)发生; ④ 水的渗流遵从达西定律 $q = ki$, 且渗透系数 k 保持不变。

一方面, 土体固结度与时间之间没有简单的数学关系^[5], 因为土层多数情况下并不均匀, 也并非完全饱和, 且水的渗流只有在砂中才满足达西定律。

因此,基于太沙基理论的固结系数和固结特性推导结果与黏土或粉土的固结试验结果并不完全相符。

另一方面,人们普遍认为固结系数是随固结过程的进行而逐渐减小,但是,土体是具有区域性的,不同地区土的固结系数的变化规律也不尽相同。

无论现阶段哪一种方法都不能精确地将真正的固结系数量化求出来,所以很有必要对固结系数进行系统的研究,从其变化的趋势中寻找出固结系数随固结过程变化的规律。

本文基于时间对数法和时间平方根法,对重塑黄土的常规固结试验结果进行了研究。得到了不同加载条件下两种算法的计算结果,并对固结系数、密度以及结构度等参数进行了对比分析。

1 试验方案

固结试验所用黄土取自甘肃兰州,其主要土力学指标包括自然干密度为 $1.28 \text{ g/cm}^3 \sim 1.83 \text{ g/cm}^3$, 颗粒相对密度为 2.7,液限 w_L 为 28.2%,塑限 w_p 为 20%,塑性指数 I_p 为 8.2。粒度分析表明,该土样的颗粒组成(质量)为:粒径 $< 0.005 \text{ mm}$ 的占 9.3%; $0.005 \text{ mm} < \text{粒径} < 0.075 \text{ mm}$ 的占 65.3%; $0.075 \text{ mm} < \text{粒径} < 2 \text{ mm}$ 的占 25.4%。

共进行了 9 组不同压力荷载作用下的标准固结试验,稳定标准参照《土工试验规程》(SL237 - 1999)^[6],加载方案如表 1 所示。

表 1 固结试验方案表

加载方案	试样 1	试样 2	试样 3	试样 4	试样 5	试样 6	试样 7	试样 8	试样 9
第一级荷载/kPa	50	50	50	50	50	50	50	50	50
第二级荷载/kPa	100	100	100	100	100	100	100	100	
第三级荷载/kPa	200	200	200	200	200	200	200		
第四级荷载/kPa	300	300	300	300	300	300			
第五级荷载/kPa	400	400	400	400	400				
第六级荷载/kPa	500	500	500	500					
第七级荷载/kPa	600	600	600						
第八级荷载/kPa	700	700							
第九级荷载/kPa	800								
最终荷载/kPa	800	700	600	500	400	300	200	100	50

2 固结系数算法的选用

确定固结系数的方法有多种,普遍采用的有时间平方根法和时间对数法。

时间平方根法计算公式为:

$$C_v = \frac{0.848h^2}{t_{90}} \quad (1)$$

式中: C_v 为固结系数(cm^2/s); h 为最大排水距离,等于某级压力下试样的初始和终了高度的平均值(cm); t_{90} 为固结度达到 90% 时所用时间(s)。

时间对数法的计算公式为:

$$C_v = \frac{0.179h^2}{t_{50}} \quad (2)$$

式中: t_{50} 为固结度达到 50% 时所用时间(s)。

3 相关计算结果

3.1 固结系数

基于时间平方根法计算出每个试样在每级荷载下的固结系数 C_v ,荷载与固结系数的关系如图 1 所示。

示。

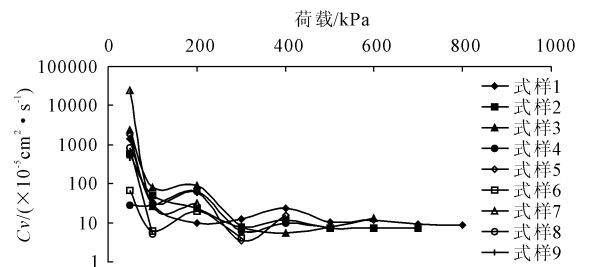


图 1 基于时间平方根方法的固结系数变化

从图 1 中可见,随荷载增大,固结系数从整体上看表现为减小的趋势。当荷载较小时,固结系数较大;当荷载较大时,固结系数较小且变化稳定。另外,固结系数并不是单调变化的,而呈震荡式递减,即基本呈现为“大一一小一大一小……”的规律变化。但随着荷载的增大,震荡幅度越来越小。

基于时间对数法计算出每个试样在每级荷载下的固结系数 C_v ,荷载与固结系数的关系如图 2 所示。

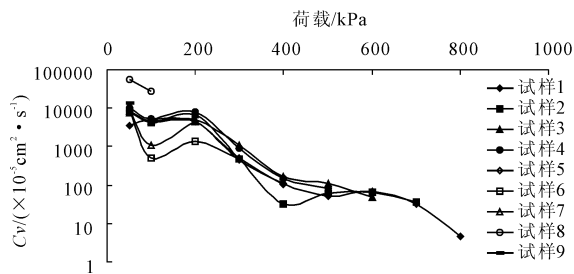


图 2 基于时间对数法的固结系数变化

从图 2 可以看出,基于时间对数法计算出的结果有着和基于时间平方根法计算出的结果有着类似的规律。即随荷载增大,固结系数从整体上看均表现为逐步减小的趋势,且均表现为震荡式变化,即以“大—小—大—小—……”的规律变化。

与图 1 相比,图 2 中的固结系数变化曲线显示的更具有梯度化,虽然震荡幅度也是在逐级减小。研究表明,图 1 和图 2 中的固结系数曲线的下降梯度不一样,主要原因是所采用的算法不一样。

由图 1 和图 2 中的曲线走势可以看出,它们都具有震荡式逐渐变小的变化规律,说明土体固结过程中固结系数出现震荡化的现象不是一个偶然现象,而是客观存在的。

从时间平方根法和时间对数法固结系数曲线图中挑出最能反映曲线变化趋势的试样 2 的固结系数变化曲线,并将这两条曲线画在一个图中作清晰对比,见图 3。

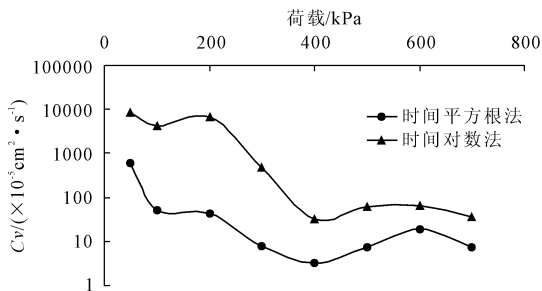


图 3 固结系数对比走势曲线图

由图 3 可知,上面总结出的固结系数的变化规律是正确的,因为时间对数法和时间平方根法计算出的固结系数的变化规律趋势都大体相同,都呈现出“随着土样上所加荷载值的变化,土体的固结系数是不断变化的,出现‘震荡式递减’的规律”。

3.2 密度

固结试验结束后,从固结仪中将试样取出,然后从每个试样中取 3 个长方体(2 cm × 2 cm × 1 cm)样品,计算出样品的密度并求其平均值,作为每组试样的最终密度,然后以荷载值为横坐标,以九组试样的

密度为纵坐标,得到的曲线如 4 所示。

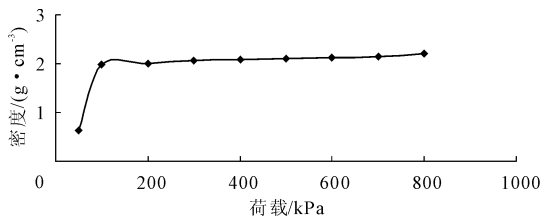


图 4 不同固结压力作用下试样的密度

从图 4 中看出,土体密度随着荷载的增大而增大,曲线在开始阶段(压力 0 ~ 100 kPa 阶段)上升较快,当荷载从 100 kPa 开始至最后,曲线上升的很慢。结合图 1、图 2、图 4 可以发现,三幅图中的曲线都是在横坐标为 50 kPa ~ 100 kPa 阶段变化比较快,说明土的初始密度也是影响土体固结系数的一个重要因素,而土的初始密度直接反映出土的初始孔隙率,所以,土的固结系数也受土体初始孔隙率的影响,而并非只取决于荷载的大小。同样荷载条件下,不同初始孔隙率的土体的固结速率也不一样。

4 土体结构

在材料科学中,根据洛氏硬度计算公式 $HR = H/C$ 便可计算出洛氏硬度,其中 H 为压入深度的大小, C 为常数。借鉴洛氏硬度公式,本文引入土体的结构度概念。

根据孔令伟等^[7]的研究成果,土的初始状态可以认为是自由状态,此时土体结构性^[8]不受荷载影响。随着垂直荷载的加载,土体原来的结构性开始破坏,如图 5 中系列 2 曲线所示。土体原来的结构性在遭到破坏的同时,新的结构性同时也在增强,如图 5 中系列 1 曲线所示^[4-7]。

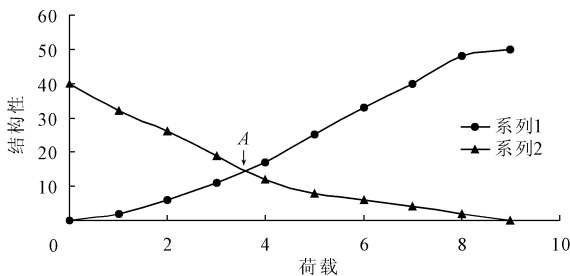


图 5 固结过程中土体结构性变化示意图

图中两条曲线的交点 A 为土体原来的结构性与新建立的结构性等同时的点。在外部荷载作用下,结构性继续朝着新结构性增强的方向发展,直到旧结构性完全破坏,新结构性完全建立为止。为了研究不同压力作用下对应土体的结构度,这里定义

固结度等于 60% 时的结构度 M 作为标准, 作为表示土体的结构性强弱。

$$M = \frac{h_{0.6}^2}{P_n t_{0.6}} \quad (3)$$

式中: $h_{0.6}$ 为固结度为 60% 时的土体压缩量; P_n 为荷载; $t_{0.6}$ 为达到 60% 固结度时所需要的时间。 M 越小, 则说明土体结构性越强。结构度 M 和洛氏硬度一样, 也是无量纲的。

表 2 结构度 M 的计算

试样编号	h/mm	$h_{0.6}/\text{mm}$	$t_{0.6}/\text{s}$	P_n/kPa	M
试样 9	12	7.2	35700	800	1.815×10^{-6}
试样 8	12	7.2	3165	700	2.339×10^{-5}
试样 7	13	7.8	2512	600	4.037×10^{-5}
试样 6	18	10.8	2930	500	7.962×10^{-5}
试样 5	16	9.6	1710	400	1.347×10^{-4}
试样 4	22	13.2	588	300	9.878×10^{-4}
试样 3	45	27.0	37	200	9.851×10^{-2}
试样 2	127	76.2	131	100	4.432×10^{-1}
试样 1	58	34.8	20	50	1.211

根据 M 的计算式, 将各试样的 M 值汇聚在一起作图, 可得到一条曲线(纵坐标取对数), 这里将此曲线定义为土体结构度曲线, 简称结构度曲线。

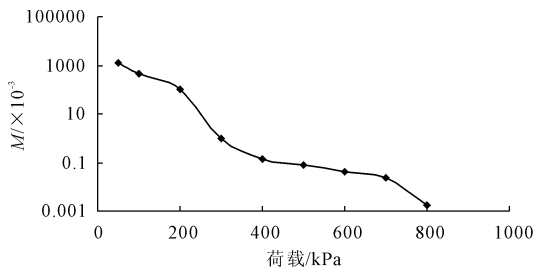


图 6 土体结构度曲线

由图 6 可见, 随荷载增大结构度逐渐减小。根据结构度 M 的定义, 很明显地看出土体的结构性在持续增强。曲线在较小荷载作用下的结构度曲线斜率比较大荷载作用下的结构度曲线斜率大, 说明, 随荷载增大, 结构度逐渐减小且减小的幅度越来越小。

从压力 50 kPa 到压力 400 kPa 之间, 土体结构度系数 M 变化的较快。这主要因为刚开始加压时, 土体颗粒间距离较大, 排列疏松, 结构性较弱, 结构平衡很容易就被破坏掉了; 从压力 400 kPa 到压力 700 kPa 之间, 土体结构度系数 M 变化很缓慢。这是因为在逐级加载的过程中, 由于水、气的排除, 土体越来越密实, 土体中的土颗粒之间的距离越来越小, 土体中孔隙越来越少, 导致土体的结构性变得越

来越强。

图 6 中曲线也可理解为: 对于同一种土, 其初始结构度越小, 其初始密度就越大, 孔隙率就越小, 土体的稳定性越好。要打破旧平衡, 建立新平衡, 外界需要对其施加更大的荷载。从结构度方面再次解释了初始密度对于固结系数的影响。土体结构度曲线较好地反映了土体的固结特性。

5 结 论

在兰州粉质粘土固结试验的基础上, 计算了不同压力下的固结系数。研究了不同压力作用下固结系数的变化规律, 并进一步定义了表示土体结构性强弱的结构度 M 。研究表明, 土体固结系数曲线是一条类似于地震波的震荡曲线, 而结构度曲线是一条具有明显台阶的非线性曲线。这两条曲线都表现出随压力增大而逐渐递减的趋势。土体固结过程是土体结构性在外加压力作用下由起初的平衡——平衡破坏——新的更稳定平衡建立的一个过程。

土的固结系数 C_v 并不是单方面由外加荷载的大小所决定, C_v 还取决于土体初始孔隙率, C_v 是所加荷载和土体初始孔隙率的函数。所受荷载越大, 土体初始孔隙率越大, 则固结系数越大, 排水越快; 所受荷载越小, 土体初始孔隙率越小, 则固结系数越小, 排水越慢。而土体的结构性强度是随着固结的进行, 变得越来越强。

参考文献:

- [1] 马 驯. 固结系数与固结压力关系的统计分析及其研究[J]. 港口工程, 1993, (1): 46-53.
- [2] 魏汝龙. 从实测沉降过程推算固结系数[J]. 岩土工程学报, 1993, 15(2): 12-19.
- [3] 钱家欢, 殷宗泽. 土工原理与计算[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1996: 202-207.
- [4] 商卫东, 白 冰, 蔡文雅. 荷载随时间变化情况下非线性固结问题的求解方法[J]. 水利与建筑工程学报, 2010, 8(1): 27-29, 34.
- [5] 李顺群, 张业民, 裴玉萍. 饱和粘土一维固结系数的非线性研究[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2002, 21(6): 726-729.
- [6] 中华人民共和国水利部. SL237-1999. 土工试验规程[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999.
- [7] 孔令伟, 郭爱国, 陈善雄, 等. 膨胀土的承载强度特征与机制[J]. 水利学报, 2004, 35(11): 56-58.
- [8] 饶为国, 赵成刚, 王 哲, 等. 一个可考虑结构性影响的土体本构模型[J]. 固体力学学报, 2002, 23(1): 34-39.