

文章编号:1673-2049(2008)03-0102-06

一维固结理论中固结系数的试验分析

李又云,李 哲,谢永利

(长安大学 特殊地区公路工程教育部重点实验室,陕西 西安 710064)

摘要:利用长安大学改装的 K_0 固结仪,对原状土样与重塑土样进行了固结渗透试验,根据试验所得到的数据,分别对 2 种土体的变形与渗透特性进行了分析,并结合太沙基一维固结理论,得到了固结系数的确定方法;在此基础上,对固结系数的变化进行了非线性分析,揭示了固结系数在固结过程中的变化规律及土体结构性对它的影响,这对准确计算地基土体的固结沉降有指导作用。

关键词:土体结构;固结系数;渗透系数;固结变形;试验分析

中图分类号:U411.5

文献标志码:A

Experiment Analysis of Consolidation Coefficient on One-dimensional Consolidation Theory

LI You-yun, LI Zhe, XIE Yong-li

(Key Laboratory of Highway Engineering in Special Region of Ministry of Education,
Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

Abstract: Experiments of consolidation and permeability on undisturbed soil and remolded soil were performed respectively by using K_0 consolidation instrument modified by Chang'an University. The deformation and permeability property were analyzed according to the data got from the experiments, and the determined method of one-dimensional consolidation coefficient was gained by using Terzaghi's one-dimensional consolidation theory. Based on this, the consolidation coefficient was analyzed by this method in order to reveal its changing law and influence from soil structure during consolidation. This has guiding effect for accurately calculating soil ground consolidation settlement.

Key words: soil structure; consolidation coefficient; permeating coefficient; consolidation deformation; experiment analysis

0 引 言

固结系数是太沙基一维固结理论中一项重要的物理指标,该指标的获得有 2 种途径:现场试验和室内试验。一般而言,通过现场试验得到的固结系数能较好地反映实际情况,但是周期较长且容易受到很多因素的影响,试验结果有很大的离散性,因此,固结系数基本上是通过室内试验获取的。现有通过

室内固结试验计算固结系数的方法很多,在这些方法中既有做图法(经验法)也有解析法,虽然这些方法在理论上是合理的,但在确定固结系数时,人为因素影响较大,因而同一种土体用不同方法所得到的固结系数可能相差比较大,因此,如何有效地确定固结系数受到了许多学者的关注^[1-3]。文献[4]中指出:固结系数的不确定性是传统固结理论计算变形沉降的局限性。根据太沙基对固结系数的定义,文

收稿日期:2008-04-25

基金项目:国家西部交通建设科技项目(2001 318 000 19)

作者简介:李又云(1973-),男,山东聊城人,讲师,工学博士,E-mail:liyoyun2006@163.com。

献[2]中指出:确定固结系数惟一合理的方法就是根据定义,通过分别测定渗透系数 k 与压缩系数 α 的值直接确定。然而传统的压缩试验与渗透试验所采用的仪器和试验方法完全不同,要分别得到其值,试验成本也较高。

另外,在太沙基一维固结理论中,通常假定压缩系数 α 及其渗透系数 k 为常量,不随时间变化。大量的试验表明,在固结过程中,渗透系数 k 与压缩系数 α 会随着固结变形的变化而变化,并且变化的幅度较大。因此,传统理论将其视为常量,虽然在计算上比较简便,但不能真实地反映固结系数在固结过程中的变化规律,其应用具有很大的局限性^[5-6]。

太沙基一维固结理论中提出了固结系数的计算公式,但是直接利用计算公式对固结系数进行确定的研究目前不多见。本文中笔者结合太沙基一维固结理论,对固结系数的计算进行了理论推导。在此基础上,在可同时进行固结压缩和渗透试验的固结试验仪器上对固结系数的变化规律进行了分析。

1 固结系数的推导

由太沙基一维固结理论,在饱和软土层顶面下深度 z 处取一微单元。根据固结渗流的连续条件,微单元体在任意时间 t 的水量变化率等于同一时间该单元孔隙体积的变化率,从而可得

$$\frac{\partial e}{\partial t} = \frac{k(1+e_0)}{\gamma_w} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad (1)$$

式中: e 为时间 t 时的孔隙比; u 为孔隙压力; γ_w 为水的重度; e_0 为初始孔隙比。

由土的 $e-\lg p$ 压缩曲线(图 1, 其中 p 为固结压力), 可得如下非线性经验公式

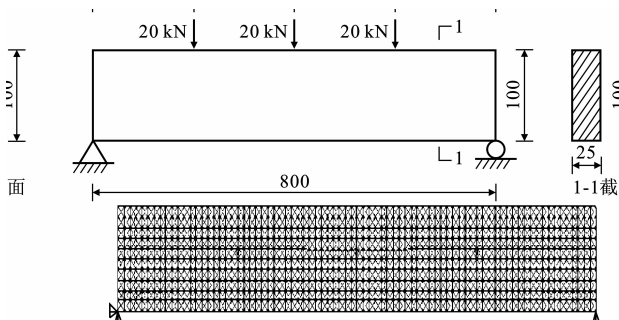


图 1 土的 $e-\lg p$ 压缩曲线

Fig. 1 $e-\lg p$ Compressive Curves of Soil

$$e = e_1 - C_k \lg \frac{\sigma'_1}{\sigma'_1} \quad (2)$$

式中: C_k 为压缩指数; σ'_1 为竖向有效应力; e_1 、 σ'_1 分别为压缩半对数曲线上任意一点所对应的孔隙比和有

效应力。

通过分析大量试验数据发现固结过程中压缩性和渗透性的变化规律,并可表示为如下具有广泛代表性的非线性经验公式,即

$$e = e_1 + C_k \lg \frac{k}{k_1} \quad (3)$$

式中: C_k 为渗透指数,即孔隙比-有效应力($e-\sigma'$)和孔隙比-渗透系数($e-k$)半对数曲线的斜率; k_1 为渗透半对数曲线上相应于 e_1 的渗透系数。

根据体积压缩系数的定义,结合式(2)可得

$$m_v = \frac{1}{1+e_0} \frac{\partial e}{\partial \sigma'} = m_{v0} \frac{\sigma'_0}{\sigma'} \quad (4)$$

式中: σ'_0 为土体初始有效应力; m_{v0} 为土体初始体积压缩系数, $m_{v0} = \frac{C_c}{(1+e_0)\sigma_0 \ln 10}$ 。

由式(2)、(3)可以得出渗透系数的表达式为

$$k = k_1 \left(\frac{\sigma'_1}{\sigma} \right)^{\frac{C_c}{C_k}} = k_0 \left(\frac{\sigma'_0}{\sigma} \right)^{\frac{C_c}{C_k}} \quad (5)$$

土体的固结系数可以写为

$$C_v = \frac{k}{m_v \gamma_w} = C_{v0} \left(\frac{\sigma'_0}{\sigma} \right)^{\frac{C_c}{C_k} - 1} \quad (6)$$

式中: C_{v0} 为初始固结系数, $C_{v0} = \frac{k_0}{m_{v0} \gamma_w} = \frac{k_0}{\gamma_w} \cdot \frac{(1+e_0)\sigma'_0}{0.434 C_c}$ 。

式(6)表明,固结系数是渗透系数、压缩指数和有效应力的函数,与固结时间有关。同时,从式(6)可以看出:当指数项为 0 时,则土体的固结系数变为常量,退化为太沙基的基本假定条件;当其不为 0 时,固结系数在整个过程中是一个变化的量,反映了固结系数随压缩指数与有效应力的变化规律。

2 室内固结试验设备

试验仪器 K_0 固结仪由长安大学自行改装而成,该仪器除可进行常规试验外,还可同时测出同一土样的侧向固结压力、孔隙水压力与土体的渗透系数,其结构如图 2 所示。具体的试验过程和具体的操作步骤见《公路土工试验规程》(JTG E40—2007),在此就不作具体说明。由图 2 可以看出,当利用该试验设备进行常规压缩固结试验时,如果在试验过程中需测定土样的侧向固结压力,则只需把侧压力传感器的开关置在开通的位置即可。基于该试验设备独特的结构,如需要测定土样的渗透系数,可通过该仪器分别做常水头渗透试验或变水头试验,在渗透试验时,既可以在每级固结压力作用下土

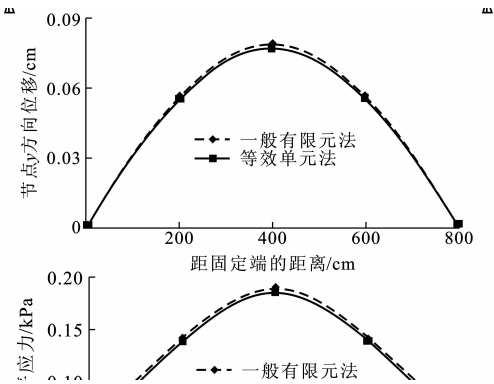


图 2 K_0 固结仪
Fig. 2 Instrument of K_0 Consolidation

样变形稳定后进行测定,也可以在土样固结变形过程中进行测定,该试验方法目前尚少见。如果在试验过程中要测定土样的孔隙水压力的变化规律,则只需要将孔隙水压力传感器的开关打开即可。

以测定土样在固结压缩过程中的变水头渗透试验为例,其主要的试验操作步骤如下:①根据需要切取原状土样或制备所需的扰动土样,切取原状土样时,应使试验受压情况与天然土层受荷方向一致;②将土样装入压缩容器内,然后调整好加压框架,为消除压活活塞、横梁及土样之间的间隙,预加 1.0 kPa 的压力,并调整好百分表;③去掉预加荷载,然后按照预定试验加载方案进行加载;④如需测定土样固结过程中的侧压力和孔隙水压力时,分别将侧压力和孔隙水压力传感器开关打开;⑤打开盛水容器进水阀,同时关闭测管底部左侧的进水阀,调整测管内的水头到一定的高度,然后关闭盛水容器进水阀,打开测管底部左侧的进水阀,进行变水头渗透试验,测定每级荷载下土样固结过程中的渗透系数;⑥如需测定沉降速率、固结系数等指标,则可按《公路土工试验规程》(JTG E40—2007)中规定的时间间隔读取试验数据,也可按照预定试验方案的要求适当调整试验读数的时间间隔,直至土样固结稳定位置,稳定时间标准可参考《公路土工试验规程》(JTG E40—2007);⑦进行试验数据整理。

由于 K_0 固结仪在进行一维固结试验的同时,可进行渗透试验,避免了传统试验方法中土体的压缩模量与渗透系数必须分别测定的缺陷,且能反映土体在固结过程中渗透系数的变化规律,与此同时还可以反映土体在固结过程中孔隙水压力的消散情况

3 试验结果与分析

3.1 土体的渗透特性

根据太沙基一维固结微分方程,固结系数的确定主要取决于土体的压缩模量及渗透系数。本文中利用 K_0 固结仪分别对取自四川达州的原状土样及重塑土样进行了固结变形及渗透试验;然后对有关试验数据进行了整理;基于渗透试验的有关数据,整理得到了渗透系数与孔隙比之间的关系曲线。

为了反映土体结构对固结系数的影响,试验土样分为 2 种:一种是原状土,为超固结土;另一种是重塑土,是由原状土样制成的。所有试验土样均采用真空饱和和技术进行饱和,土样的力学指标见表 1。

表 1 原状土与重塑土的力学指标
Tab. 1 Mechanical Indexes of Undisturbed Soil and Remolded Soil

土样类别	密度/ ($g \cdot cm^{-3}$)	初始 孔隙比	土体含水 量/%	液限/ %	塑性 指数	液性 指数	饱和 度
原状土	1.90	0.94	37.29	46.8	24.9	0.24	0.97
重塑土	1.86	1.10	38.84	49.0	25.5	0.29	0.99

大量试验和工程实测结果表明:当压应力达到结构屈服应力后,土体结构伴随有大量的破坏,此时,土体的压缩性及透水性发生了较大变化。张诚厚对广东湛江黏土和上海黏土^[7-8]的研究与 Yong 对 Leda 黏土的研究表明,结构性原状黏土具有明显的结构屈服应力,当应力增加到结构屈服应力附近时,渗透系数急剧降低,然后趋于重塑土的渗透系数,固结系数也有相似的规律^[9]。软土结构性对软土渗透性有显著影响,但此方面研究尚停留在工程实录阶段。因此,有必要对结构性软土和重塑软土的变形特性和渗透特性进行试验对比研究。

土体渗透性大小受很多因素的影响,但依据现有的研究成果,其渗透性的大小主要取决于土体孔隙比的大小及土颗粒在空间的排列状况(土体的结构性),因为这 2 种因素决定了孔隙比在土体中的分布形态及连通性,进而决定了孔隙水流动时的阻力,最终决定了渗透系数的大小。为考察原状土与重塑土 2 种不同状态下土样的渗透系数随孔隙比的变化规律,分别对这 2 种土样进行了固结渗透试验,渗透试验采用变水头方法,具体操作步骤可按第 2 节中所述的进行;为防止土样侧壁漏水,对土样侧壁进行了一定的处理。通过对土样的试验结果进行分析,得到原状土体在固结压力为 100 kPa 下的竖向有效应力与竖向变形的规律,如图 3、4 所示;同时得到了

各级荷载作用下土体的 $e\text{-lg } \sigma'$ 曲线和 $e\text{-lg } k$ 曲线,如图 5、6 所示。

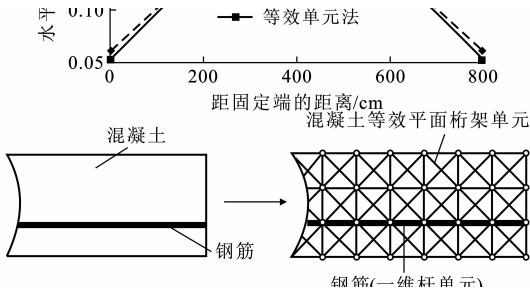


图 3 原状土的有效应力变化规律

Fig. 3 Changing Law of Effective Stress on Undisturbed Soil

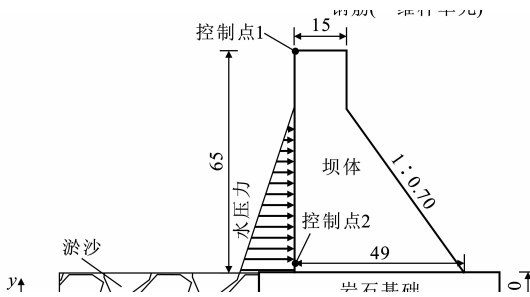


图 4 原状土的竖向变形变化规律

Fig. 4 Changing Law of Vertical Deformations on Undisturbed Soil

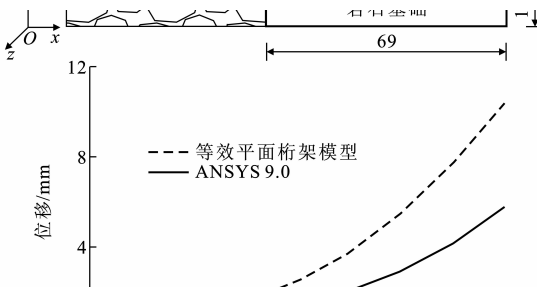


图 5 原状土与重塑土的 $e\text{-lg } \sigma'$ 曲线

Fig. 5 $e\text{-lg } \sigma'$ Curves on Undisturbed Soil and Remolded Soil

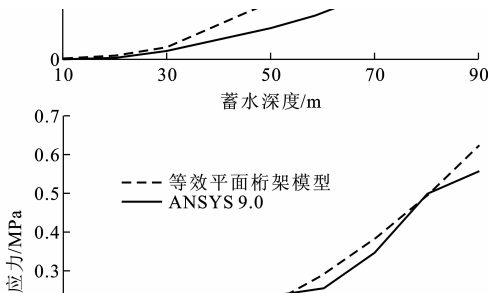


图 6 原状土与重塑土的 $e\text{-lg } k$ 曲线

Fig. 6 $e\text{-lg } k$ Curve on Undisturbed Soil and Remolded Soil

体的主固结变形已经基本达到稳定,其后期的变形基本为次固结变形。由图 4 可以看出,次固结变形量约为 0.056 mm,占整个变形量的 12.6% 左右。

图 5、6 给出了试验所用饱和软黏土进行固结与渗透联合的试验结果,反映出原状土为超固结状态的土,重塑土处于正常固结状态。通过计算,可确定该组土样的回弹指数 C_s 为 0.067,压缩指数 C_c 为 0.132,原状土的渗透指数 C_k 为 0.199,重塑土的渗透指数 C'_k 为 0.123; $\frac{C_c}{C_k}$ 为 0.66,与大部分土体的 $\frac{C_c}{C_k}$ 处于 0.5~1.0 的试验结果是相吻合的^[10]。

由图 6 可以看出,虽然原状土的孔隙比在相同的固结压力作用下比重塑土的孔隙比小,但原状土的渗透系数却比重塑土的渗透系数大,这反映了土体结构性对固结系数有着重要的影响。

3.2 固结系数分析

研究表明:天然黏土多具有架空的结构,大孔隙之间形成透通道,因此必然具有较强的透水性。不少试验资料表明,在结构破坏以前,天然黏土的固结系数可以达到同样条件下重塑土的 10~15 倍,如图 7 所示。但是,影响固结系数大小的还有压缩系数,即导致重塑土固结系数低的另一原因是压缩系数大造成的。就渗透系数来说,纯粹由孔隙比大的原因导致天然黏土的渗透系数可能比重塑土大 2~4 倍^[11-12]。

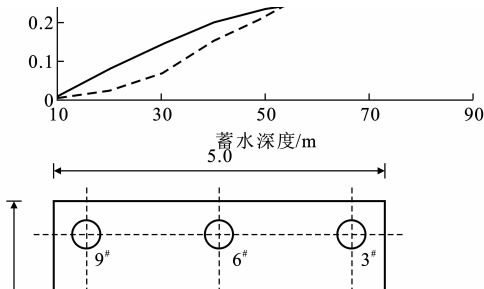


图 7 连云港淤泥固结系数

Fig. 7 Consolidation Coefficients of Sludge in Lianyungang

文献[9]中的固结系数是在常规固结试验的基础上得到的,表明了不同状态下土样的固结系数在不同的固结压力作用下的发展规律;但常用的测定方法是利用固结压缩曲线的不同部分而得到的,而不是通过固结系数的定义直接求得的,且固结试验得到的不同时刻测微表读数,不可能全部与理论值相吻合,因此,得到的固结系数有着较大的离散性。在太沙基一维固结理论的基础上,直接通过固结系数的定义计算固结系数,不失为一种较好的方法,但目前有关此方面的分析并不多见。

由图 3 可以看出,当固结时间为 600 min 时,土

- [6] DUNCAN J M. Limitation of Conventional Analysis of Consolidation Settlement[J]. Journal of Geotechnical Engineering Division, 1993, 119(9): 1333-1359.
- [7] 张诚厚, 袁文明, 戴济群. 高速公路软基处理[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997.
ZHANG Cheng-hou, YUAN Wen-ming, DAI Ji-qun. Treatment of Speedway Soft Foundation[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1997.
- [8] 张诚厚. 两种结构性黏土的土工特性[J]. 水利水运科学研究, 1983(4): 65-71.
ZHANG Cheng-hou. Soil Character on Two Kinds Structural Clay[J]. Journal of Nanjing Hydraulic Research Institute, 1983(4): 65-71.
- [9] 王年香, 魏汝龙. 沿海软粘土取土质量的对比分析[J]. 工程地质学报, 1994, 2(2): 66-75.
WANG Nian-xiang, WEI Ru-long. Comparative Analysis of Sampling Quality for Coastal Soft Clay[J]. Journal of Engineering Geology, 1994, 2(2): 66-75.
- [10] BERRY P L, WILKINSON W B. The Radial Consolidation of Clay Soils[J]. Geotechnique, 1969, 19(2): 253-284.
- [11] TAVENUE F, JEAN P, LEBLOND P, et al. The Permeability of Natural Soft Clays Part II: Permeability Characteristics[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1983, 20(4): 645-659.
- [12] YONG R N, NAGARAJ T S. Investigation of Fabric and Compressibility of a Sensitive Clay[C]//Asian Institute of Technology. Proceedings of International Symposium on Soft Clay. Bangkok: Asian Institute of Technology, 1977: 327-333.
- [13] 李志勇, 曹源文, 梁乃兴, 等. 风积沙的压实机理[J]. 中国公路学报, 2006, 19(5): 6-11.
LI Zhi-yong, CAO Yuan-wen, LIANG Nai-xing, et al. Compaction Mechanism of Aeolian Sand[J]. China Journal of Highway and Transport, 2006, 19(5): 6-11.
- [14] 王强, 刘仰韶, 傅旭东, 等. 砂土路基湿化变形和稳定性的可靠度分析[J]. 中国公路学报, 2007, 20(6): 7-12.
WANG Qiang, LIU Yang-shao, FU Xu-dong, et al. Reliability Analysis for Wetting Deformation and Stability of Sand Soil Roadbed[J]. China Journal of Highway and Transport, 2007, 20(6): 7-12.
- [15] 李志清, 李涛, 胡瑞林. 非饱和土水分特征曲线特性[J]. 中国公路学报, 2007, 20(3): 23-28.
LI Zhi-qing, LI Tao, HU Rui-lin. Property of Soil-water Characteristic Curve for Unsaturated Soil[J]. China Journal of Highway and Transport, 2007, 20(3): 23-28.
- [16] 夏建中, 江雯, 谢康和. 成层非均质地基一维固结方程半解析求解[J]. 中国公路学报, 2006, 19(3): 8-11.
XIA Jian-zhong, JIANG Wen, XIE Kang-he. Semi-analytical Solution to One-dimensional Consolidation Equation of Layered Non-homogeneous Subgrade[J]. China Journal of Highway and Transport, 2006, 19(3): 8-11.

《建筑科学与工程学报》影响力大幅度提高

根据《中国学术期刊综合引证年度报告》(2007)统计,《建筑科学与工程学报》2006年的影响因子已达到1.139,影响力大幅度提高。《中国学术期刊综合引证年度报告》是中国科学文献计量评价研究中心、中国学术期刊(光盘版)电子杂志社根据《中国学术期刊综合评价数据库(CAJCED)》2006年6182种统计刊源析出的214万条中国期刊引文数据及CNKI“中国期刊网”中心网站2006年1~12月全文下载记录(1.5亿篇次)的大样本数据进行统计分析的,具有一定的权威性。此数据表明,《建筑科学与工程学报》在中国土木建筑领域的影响力已得到大幅提升。

《建筑科学与工程学报》自2005年改刊名以来,加大了约稿力度,汇集了众多建筑科学领域的名家、大家的稿件,国家自然科学基金、“八六三”、“九七三”等国家级科研项目产生的学术论文占70%以上。《建筑科学与工程学报》荣获“2005、2006年度陕西省科技期刊审读优秀奖”。2006年11月,在教育部科学技术司组织开展的“首届中国高校精品·优秀·特色科技期刊奖评比活动”中,《建筑科学与工程学报》荣获首届中国高校特色科技期刊奖。《建筑科学与工程学报》正在不断进步,不断完善,已成长为建筑领域的权威性学术期刊。