

北京区域土的压缩性与物理指标相关性分析^①

孙毅力, 于洪民

(北京市勘察设计研究院有限公司 北京 100038)

摘要:以北京区域土为研究对象,进行土工参数的变异性分析,研究其物理力学指标的相关性。结果表明:物理性质指标的变异性较小,而力学指标的变异性则相对较大;粉土压缩性的主要影响因素为自重压力、天然密度、饱和度、孔隙比等,而影响黏性土的主要因素为自重压力、含水率、天然密度、液性指数等;应用多元线性回归模型得到压缩模量与含水率、天然密度、孔隙比、自重应力等的关系式。

关键词:北京区域土;压缩模量;相关性;多元回归拟合

中图分类号: TU441

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2015)增刊 1-0026-04

DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2015.02.0563

Correlation Analysis of the Compressibility and Physical Indices of Soils in Beijing

SUN Yi-li, YU Hong-min

(BGI Engineering Consultants Ltd., Beijing 100038, China)

Abstract: The compression modulus of soil is the important indicator that can be used to evaluate the compressibility of soil and calculate foundation deformation, validating its importance in engineering research. In this study, soils from Beijing, were analyzed to determine the variability of geotechnical parameters and the relation between the physical and mechanical indices. The analysis results showed that there was little variability in the physical property indices, but the variability of the mechanical indices was relatively large. For example, the compressibility of silt was affected by the gravity stress, the natural density, the saturation, the porosity ratio, and other factors. The mechanical properties of cohesive soils were affected by the gravity stress, the moisture content, the natural weight density, and the liquidity. A multivariate linear regression model of the compression modulus, the moisture content, the natural density, and the gravity stress was developed. This model indicated that there was regional representation in the soils tested.

Key words: soils in Beijing; compression modulus; correlation; multiple regression fitting

0 引言

土的压缩模量是评价土的压缩性和计算地基变形的重要指标,具有重要的工程研究价值。土的压缩模量通常是通过侧限条件下固结试验中的各项参数来直接计算的,事实上地基土的特性极其复杂,其压缩模量随载荷不断变化,如何正确估算是计算沉

降的关键。评价地基压缩性应该以能够反映地基土受到超过自重压力的外力作用后,土体所表现出的应力-应变特性为衡量准则。

《北京地区建筑地基基础勘察设计规范》(DBJ 11-501-2009)中压缩-固结试验并不是标准的固结试验。一般情况下压缩-固结试验方法可采用 60 min

^① 收稿日期:2015-04-01

作者简介:孙毅力(1983-),男,硕士,工程师,现主要从事水工环地质工程。E-mail:61816575@qq.com

快速法,即每级载荷压缩时间为 60 min。北京地区的大量对比试验证明,该方法可以满足工程要求,且大大加快试验速度。在进行压缩性评价时压缩模量 E_s 应取自重力至自重压力与附加应力之和的压力段计算,并考虑地下水的影响,地下水位以下的岩土体应采用浮重度,这种方法比较符合实际并能够很好地满足工程要求^[1]。

岩土体的物理力学性质之间常常是相互影响、相互关联的。本文以北京区域土为分析对象,运用相关性分析的方法研究各物理指标对土压缩性的重要影响。

1 土工参数的变异性分析

文中统计所用的大量数据来源于北京平原区数千个钻孔资料,基本上代表了北京市区域土的实际情况,统计数据具有一般性。

根据概率论和数理统计理论^[2],设 X_1, X_2, \dots, X_n 为试验值,则这组试验数据的平均值 μ 、标准差 σ 和变异系数 δ 分别由式(1)~(3)计算:

$$\text{平均值 } \mu = (X_1 + X_2 + X_3 + \dots + X_n)/n \quad (1)$$

$$\text{标准差 } \sigma = \sqrt{\sum (X - \mu)^2 / (n - 1)} \quad (2)$$

$$\text{变异系数 } \delta = \sigma/\mu \quad (3)$$

表 1 北京地区粉土物理力学性质指标统计分析成果表(样本容量=2 011)

Table 1 Statistics of physico-mechanical indices of silt in Beijing (The sample size=2011)

指标	平均值 μ	标准差 σ	变异系数 δ
含水率 $w/\%$	19.7	4.15	0.21
天然密度 $\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	2.00	0.09	0.04
饱和度 S_r	0.87	0.15	0.17
孔隙比 e	0.61	0.08	0.13
液限 $w_p(\%)$	26.3	2.76	0.10
塑限 $w_L(\%)$	20.3	2.52	0.12
塑性指数 I_p	6.00	0.94	0.16
压缩模量 E_s/MPa	19.1	11.4	0.34

基于所收集的北京区域粉土的物理指标、力学指标,按式(1)~(3)进行统计分析,分析结果列于表 1。由于压缩模量随土深度增加,其变异性十分显著,仅取土层深度范围 1~6 m 来分析压缩模量的变异性,得出以下结论:

(1) 北京区域土的物理性质指标变异性与力学性质指标变异性相差甚大,进行地基基础可靠性设计时要区别对待。

(2) 北京区域土物理性质指标的变异性较小,

进而验证了土的分布具有一定的区域性。在较小的区域内,由于沉积环境等内在因素和人工用水等外在因素的相似性,土的物理指标变异性不大,如所有物理性质指标中天然密度的变异系数仅为 0.04,含水率的变异系数最大,也不过是 0.21。因此,通过钻孔取样,用局部土体指标来代表整个场地土体的物理指标,一般能够满足工程设计精度要求。

(3) 北京地区土的力学指标如压缩模量的变异性相对较大,变异系数基本在 0.35 左右。土的压缩性具有更大的不确定性和离散性,即便是同类土体的物理指标差别不大,但是由于土体的散体物质,存在颗粒间的排列组合问题,具有结构性特征,此外取样、运输、试验等环节对土的扰动,而使得压缩性表现出较大的差异性。

2 土的压缩性与物理指标的相关性分析

因子分析是一种寻找隐藏在可测变量之中,不能或不易被观测到,却影响或支配可测变量的潜在因子,并估计潜在因子对各可测变量的影响程度及潜在因子之间关联性的统计方法。岩土体的各物理、力学指标是其物理、力学性质的反映,可以用相关系数来描述岩土体不同的物理、力学性质之间的相互影响和相互关联的程度。

土在外力作用下的变形实质上是土粒或集合体及不同类型的水和气体相互移动的结果。由单个物理指标来分析土的压缩性,仅能反映压缩模量与单个指标的相关性,比较片面。实际上土的压缩性是多个物理指标的综合作用的结果。本文利用土的多个指标如 $\omega, \rho, S_r, e, \omega_p, \omega_L, I_p, I_L, p_z$ 等来确定影响其压缩性的主要因素,为试验数据分析提供依据;利用 SPSS 通用统计软件评价物理指标与压缩模量的相关性大小^[4],进而确定影响压缩模量的主要因素。

表 2 显示了北京区域土的压缩模量与各指标的相关系数,即压缩模量与各指标的相关概率性大小,相关系数在 $[-1, 1]$ 。

对砂质粉土而言,压缩模量与各物理指标的相关概率排序如下:自重应力 > 天然密度 > 饱和度 > 天然孔隙比,其余因素对压缩模量影响甚微,不予考虑。压缩模量与自重应力、天然密度、饱和度为正相关,与孔隙比为负相关。可以认为影响砂质粉土压缩模量的主要因素为自重应力、天然密度、饱和度以及孔隙比。

对于黏质粉土,压缩模量与各物理指标的相关

表2 北京区域土压缩模量与各个物理指标相关性结果

Table 2 The correlation between compression modulus and physical index of soil in Beijing

土的压缩模量	含水率	天然密度	饱和度	孔隙比	液限	塑限	塑性指数	液性指数	自重应力
砂质粉土	-0.07	0.27	0.21	-0.20	-0.04	0.04	-0.02	-0.11	0.77
黏质粉土	-0.05	0.27	0.17	-0.24	-0.01	0.03	-0.09	-0.08	0.78
粉质黏土	-0.24	0.29	0.04	-0.28	0.01	0.01	-0.01	-0.37	0.80
重粉质黏土	-0.28	0.32	0.03	-0.32	0.09	0.12	-0.05	-0.47	0.80
黏土	-0.42	0.49	0.06	-0.46	-0.09	0.02	-0.17	-0.49	0.77

概率排序如下:自重应力>天然密度>天然孔隙比>饱和度,其余因素的影响忽略不计。压缩模量与自重应力、天然密度、饱和度为正相关,与孔隙比为负相关。可以认为影响黏质粉土压缩模量的主要因素为自重应力、天然密度、饱和度以及孔隙比。

对粉质黏土、重粉质黏土、黏土而言,压缩模量与各物理指标的相关概率排序如下:自重应力>液性指数>天然密度>天然孔隙比>含水率,其余因素影响较小。压缩模量与自重应力、天然密度为正相关,与含水率、孔隙比、液性指数为负相关。可以认为影响黏性土压缩模量的主要因素为自重应力、液性指数、天然密度、孔隙比、含水率。

由表2可以得出以下结论:

(1) 粉土与黏性土的自重应力与压缩模量的相关系数分布在0.7~0.8,是土压缩模量最主要的影响因素,说明土的受力条件对压缩模量起决定性作用;天然密度、孔隙比对土的压缩模量影响显著。

(2) 含水率、液性指数对粉土的压缩模量影响甚微,对黏性土却影响显著。

(3) 影响粉土压缩模量的主要因素为自重应

力、天然密度、饱和度、孔隙比;影响黏性土压缩模量的主要因素为自重应力、液性指数、含水率、天然密度、孔隙比。

3 压缩模量与其主要影响指标的回归关系式

描述因变量 y 如何依赖于自变量 x_1, x_2, \dots, x_k 和误差项的方程,称为多元回归模型^[5]。涉及 k 个自变量的多元线性回归模型可表示为:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + \varepsilon \quad (4)$$

其中: $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k$ 是参数; ε 是被称为误差项的随机变量。

北京区域土的力学指标压缩模量 E_s 的变异性较大,说明土的力学性质指标具有更大的不确定性和离散性。利用所统计的试验数据采用多元线性回归模型^[6],经检验相关系数均为0.7左右,适合进行多元线性回归分析。压缩模量 E_s 与主要物理指标回归关系式如表3所示。

表3的函数关系式预测的压缩模量值仅符合所统计数据70%左右的土体,分析原因主要为以下几点:

表3 北京区域土压缩模量与物理指标回归关系式

Table 3 The regression relationship between compression modulus and physical index of soil in Beijing

土的种类	多元线性回归方程	相关系数 R^2
砂质粉土	$E_s = 73.1 - 21.2\rho + 10.9S_r - 40.8e + 0.08p_z$	0.63
黏质粉土	$E_s = -57.7 + 40.9\rho - 22.4S_r + 7.5e + 0.06p_z$	0.65
粉质黏土	$E_s = -130.7 - 0.7\omega + 60.3\rho + 52.5e - 6.7I_L + 0.03p_z$	0.72
重粉质黏土	$E_s = -147.1 - 0.7\omega + 67.6\rho + 56.1e - 8.9I_L + 0.03p_z$	0.72
黏土	$E_s = -109.9 - 0.4\omega + 54.7\rho + 33.2e - 8.6I_L + 0.03p_z$	0.68

(1) 试验中的土体结构复杂,一般为岩性不均,且可能含有姜石、贝壳、有机质等,会很大程度地影响土体压缩模量。

(2) 人为因素的影响,如土在运输过程中对土的扰动,以及环刀法制备土样时对土的扰动等,会极大影响压缩模量的准确性。

(3) 土压缩模量最主要的影响因素为自重应力,为便于试验,通常将位于某一地层深度范围内的

土体取同一自重压力,这样也会影响土的压缩模量。

(4) 土的快速固结试验法一般适用于正常固结土体,对于超固结以及欠固结的土体,利用此法所得的压缩模量会有一定的偏差。

4 结语

(1) 本文以北京地区土为对象,对土工参数的变异性进行分析,结果表明:土的物理性质指标变异

性与力学性质指标变异性相差甚大。物理性质指标的变异性都不大,用局部土体指标来代表整个场地土体的物理指标,一般能够满足工程设计精度要求;而土具有复杂结构性特征,压缩性指标的变异性相对较大。

(2) 物理力学指标相关性分析结果表明:粉土压缩模量的主要影响因素为自重应力、天然密度、饱和度和孔隙比;而黏性土压缩模量的主要影响因素为自重应力、液性指数、天然密度、孔隙比、含水率。

(3) 受力条件对土的压缩性几乎起决定性作用,土深度增加,压缩模量增加;天然密度与压缩模量正相关;含水率、液性指数、孔隙比与压缩模量为负相关。

(4) 压缩模量的多元回归关系式能够较好地适用于北京区域土,对实测压缩模量的正确性判断有

一定的参考价值。

(5) 关于土的力学指标与物理指标的相关性有待于进一步分析。

参考文献(References)

- [1] 北京市规划委员会. 北京地区建筑地基基础勘察设计规范[S]. 北京:中国计划出版社,2009.
- [2] 高大钊. 土力学可靠性原理[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1989.
- [3] 田小甫,孙进忠,张彬. 北京地区粘性土物理力学指标统计分析[J]. 资源与产业,2007(4):80-84.
- [4] 阮桂海,蔡建平,刘爱玉. 数据统计与分析——SPSS 应用教程[M]. 北京:北京出版社,2005.
- [5] 贾俊平. 统计学(第三版)[M]. 北京:中国人民大学出版社,2008.
- [6] 翟静阳,冷伍明. 粘性土物理力学指标的变异性及相互关系[J]. 铁道技术,2001(1):49-51.