

等效变形模量的非线性特征分析*

张在明

(北京市勘察设计研究院, 100038)

文 摘 在瞬时沉降或最终沉降计算中, 都要用到土的变形模量 E_0 。由于室内试验和原位测试方面存在的困难, 过去对变形模量研究的报导有限。本文用载荷试验结果证明了变形模量具有非线性特征。在此基础上, 通过北京地区三类土的原位平板载荷试验的压力-变形曲线的数学表达式及其特征值分析了等效变形模量 $E_{0,eq}$ 随压力的变化特征, 并推导出相应的表达式。

关键词 平板载荷试验, 新近沉积土, 一般粘性土, 砂类土, 等效变形模量。

1 前 言

过去, 我国各类规范多采用分层总和法计算沉降, 相应的压缩模量 E_s 可从实验室直接求得, 并将取土扰动、试验条件、连同其他各种因素造成的误差一并用公式中一个总的“沉降计算经验系数”予以修正。“沉降计算经验系数”则通过积累工程实测资料经统计得到, 其变化范围从 0.2~1.4, 是相当大的^[1]。

很多国外规范或手册在计算瞬时沉降(immediate settlement)时都用 Boussinesq 的弹性解和 Schlecher 的形状影响系数; 我国最近制订的《高层建筑箱型与筏型基础技术规范(报批稿)》中也采用了叶戈洛夫的弹性方法。这类方法中, 自然要用到变形模量 E_0 。所谓变形模量与弹性力学中的杨氏模量具有相同的物理意义, 但因在土体中包含有部分残余变形, 故称变形模量。研究证明, 即使在应变不大的情况下, 土的应力-应变关系也具有非线性特征。因此, 在上述分析方法中用到的变形模量也不应该是个常量。为工程使用方便, 在本研究中, 将这种随应力水平变化的模量定义为等效变形模量。类似定义实际上在有关的土力学和土动力学问题中已经用到过。

土的变形模量可用多种方法求得, 比如: ①利用土的泊松比 μ , 通过弹性公式将压缩模量换算成变形模量; ②用三轴试验反复加卸荷求出^[2]; ③用原位平板载荷试验(PLT)求出。经过对不同方法数据分析发现, 前两种方法受各种因素, 特别是取土扰动的影响, 得到的模量偏低; 第一种方法, 偏低过多, 在工程中恐难直接使用。一般认为, 原位平板载荷试验结果虽会受基础性状和尺寸等因素的影响, 但比较符合实际力学边界条件, 因此结果较为可靠。

本文试图从北京地区大量载荷试验的 $p-s$ 曲线形态的数学模型, 研究等效变形模量随压力变化的非线性规律。在规范规定的公式即将使用时, 进行一点探讨, 应当是有意义的。

2 原位平板载荷试验 $p-s$ 曲线的数学表达式

在本院规程和北京市地方规范的制订中, 曾对北京地区的新近沉积粘性土(简称近代土)、

* 到稿日期: 1996-08-06.

一般第四纪粘性土和砂类土进行过数十组原位平板载荷试验。载荷板面积一般为 2500cm^2 , 载荷坑深度在地面下 $1.1 \sim 2.3\text{m}$ 之间, 试验方法按载荷试验规程进行。

对载荷试验结果的分析发现, 无论那种土, 如果将试验的压力 p 与变形 s 的关系绘于双对数坐标内, 都呈简单的折线(图 1)。对每个试验, 都可以找到 4 个参数, 将其 $p-s$ 曲线唯一地确定下来, 这些参数是: 折线第一段的斜率 μ_0 ; 折线第二段的斜率 μ_1 ; 折点(p_k, s_k)和“单位下沉压力”, 即载荷板下沉 1cm 对应的压力值点(p_1, s_1), $s_1=1\text{cm}$ 。我们不妨将上述 4 个指标称为载荷试验 $p-s$ 曲线的特征值。

作为举例, 在新近沉积粘土、一般第四纪粘性土和砂类土中各列出一个载荷试验结果, $p-s$ 曲线特征值见表 1, 试验曲线见图 2。三个试验的双对数曲线则一并绘于图 3。

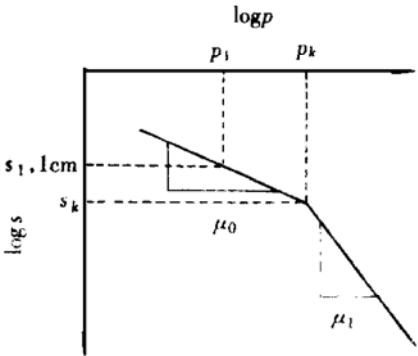


图 1 双对数载荷试验曲线关系示意图

表 1 载荷试验 $p-s$ 曲线特征值

土类	μ_0	μ_1	$p_1(\text{kPa})$	$p_k(\text{kPa})$
近代粘性土	0.97	0.49	150	102
一般粘性土	0.90	0.55	300	182
砂类土	1.29	0.89	700	315

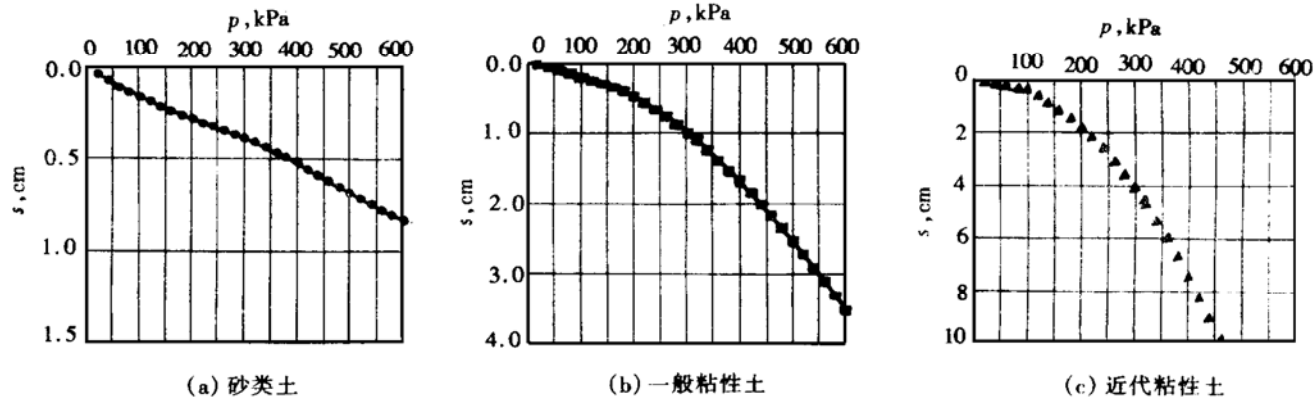


图 2 载荷试验的 $p-s$ 曲线

对数十组不同土类的 $p-s$ 曲线及其特征值的研究发现, 曲线按其特征值的某些差别可分为两类: 第一类曲线的拐点压力 p_k 大于“单位下沉压力” p_1 , 北京地区的新近沉积土和较软的粘性土属于该类; 第二类曲线的拐点压力 p_k 小于“单位下沉压力” p_1 , 北京地区的第四纪砂类土及压缩模量 E_s 大于 5MPa 的一般第四纪粘性土和粉土大体上属于该类。经简单推导, 两类曲线的方程式如下:

第一类曲线 $p_k \geq p_1$

$$\left. \begin{aligned} s &= \left(\frac{p}{p_1}\right)^{\frac{1}{\mu_0}} \cdot s_1 & (p \leq p_k) \\ s &= \left(\frac{p_k}{p_1}\right)^{\frac{1}{\mu_0}} \left(\frac{p}{p_k}\right)^{\frac{1}{\mu_1}} \cdot s_1 & (p > p_k) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

第二类曲线 $p_k < p_1$

$$\left. \begin{aligned} s &= \left(\frac{p_k}{p_1}\right)^{\frac{1}{\mu_1}} \left(\frac{p}{p_k}\right)^{\frac{1}{\mu_0}} \cdot s_1 & (p \leq p_k) \\ s &= \left(\frac{p}{p_1}\right)^{\frac{1}{\mu_1}} \cdot s_1 & (p > p_k) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

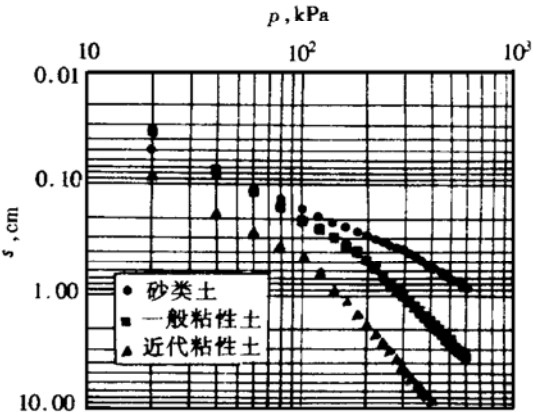


图 3 各类土载荷试验的双对数曲线

这样,只要知道了 4 个特征值,便可绘出 $p-s$ 曲线的形态。由于在规范制定中,建立了北京地区各类土的 4 个特征值与其室内外试验参数的统计关系,对于某特定土,只要知道其物理、力学指标,它的载荷试验的 $p-s$ 曲线的形态也就大体上被掌握了。这就为本文后面部分估算土的变形模量提供了很大的方便。北京地区各类土 4 个特征值的变化范围如表 2 所示^[3]。

表 2 北京地区各类土 $p-s$ 曲线特征值的范围

土 类	μ_0	μ_1	p_1 (kPa)	p_k (kPa)
近代粘性土	0.60~1.05	0.49 左右	25~175	75~108
一般粘性土	0.78~1.05	0.43~0.70	150~500	131~250
砂类土	0.99~1.36	0.58~0.96	250~800	163~341

3 等效变形模量的计算及其非线性特征

如前述,对于不同的压力段,可用弹性公式反算其等效变形模量 $E_{0,eq}$ 。对于圆形载荷板,

$$E_{0,eq} = \frac{pb}{s}(1 - \mu^2) \quad (3)$$

式中 b 为载荷板的直径; μ 为泊松比。

将式(1)、(2)代入式(3),便可得到等效变形模量与载荷试验特征值之间的关系。当然,对于等效变形模量 $E_{0,eq}$ 而言,我们主要是关心折线折点以前的关系,下面也只分别列出两类曲线这一部分的表达式; p 大于 p_k 之后的算式同样也可列出,只是此时由于变形过大,对 $E_{0,eq}$ 的研究,意义就不是很大了。虽然如此,我们还是将折点以后的关系连同折点以前的,一并表示于图(4)和图(5)中,以便比较。

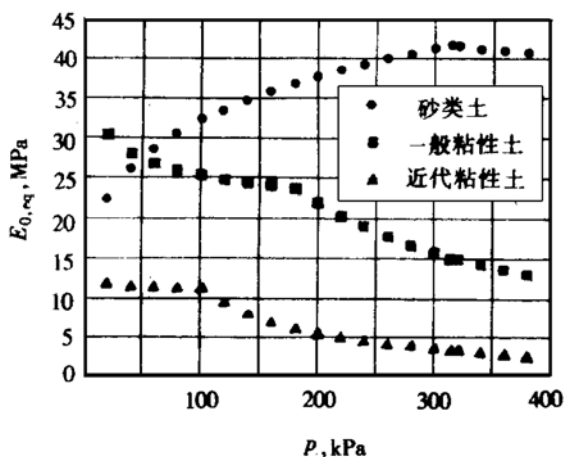
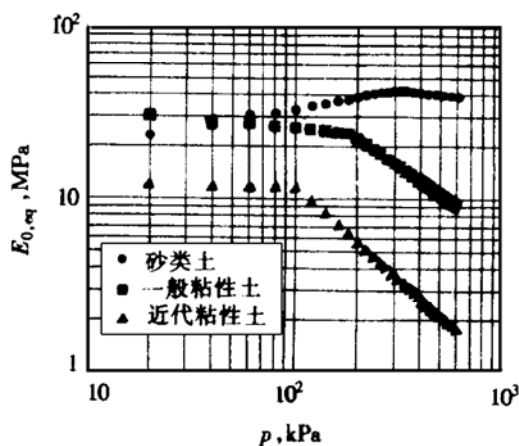


图 4 等效变形模量随压力的变化

图 5 等效变形模量与压力 p 之间的对数关系

这样,第一类曲线 $p_k \geq p_1$

$$E_{0,eq} = \frac{p}{\left| \frac{p}{p_1} \right|^{\frac{1}{\mu_0}}} b(1 - \mu^2) = p^{(1 - \frac{1}{\mu_0})} p_1^{\frac{1}{\mu_0}} b(1 - \mu^2)$$

如令

$$\phi = p_1^{\frac{1}{\mu_0}} b(1 - \mu^2)$$

上式可简单地表示为

$$E_{0,eq} = \phi_1 p^{(1 - \frac{1}{\mu_0})} \quad (4)$$

同理,第二类曲线 $p_k \leq p_1$ 有

$$E_{0\cdot eq} = \phi_2 p^{(1-\frac{1}{\mu_0})} \quad (5)$$

$$\phi_2 = (p_1/p_k)^{\frac{1}{\mu_1}} p_k^{\frac{1}{\mu_0}} b(1-\mu^2)$$

式(4)、(5)用很简洁的形式表达了我们所关心的双对数坐标折点以前等效变形模量与压力之间的非线性关系。

4 结 语

(1) 本文所探讨的是 $E_{0\cdot eq} = f(p)$ 的关系。由于载荷试验中, s 与 p 是相随增长的, 也就是说等效变形模量 $E_{0\cdot eq}$ 也是变形或应变的函数。

(2) 在过去见到的计算瞬时沉降的文献中, 很多研究工作者讨论过变形模量随深度的变化。本文则证明了, 如果将原位平板载荷试验的压变曲线用 4 个特征值来表述, 则等效变形模量 $E_{0\cdot eq}$ 与它们关系密切。对于某特定土, 这 4 个特征值应为定值, 那么, 等效变形模量与所施加的压力 p 的指数之间呈直线变化关系, 该指数由双折线中第一段的斜率 μ_0 确定。在 $E_{0\cdot eq} - p$ 双对数坐标内二者呈直线关系。

(3) 在载荷试验的第一阶段, $E_{0\cdot eq}$ 可能随 p 的增加降低或增长, 取决于 μ_0 小于 1 或大于 1。在北京地区较硬的土类上进行的载荷试验都呈现了 μ_0 大于 1 的趋势。

(4) 在我国的一些规范准备采用瞬时沉降一类弹性公式时, 对其基本参数等效变形模量的非线性特性的进一步深入研究具有十分迫切的意义。本文希望引起人们对这一问题的注意。

参 考 文 献

- 1 中华人民共和国国家标准. 建筑地基基础设计规范(GBJ 7-89) 北京: 中国建筑工业出版社, 1989.
- 2 Holtz R D, Kovacs W D. An Introduction to Geotechnical Engineering. Prentice-Hall Inc, New Jersey, 1981.
- 3 中华人民共和国地方标准. 北京地区建筑地基基础勘察设计规范(DBJ 01-501-92). 北京: 1992.

Analysis of Nonlinear Behavior of Equivalent Deformation Modulus

Zhang Zaiming

(Beijing Geotechnical Institute, 100038)

Abstract Boussinesq's elastic solution as well as the Schlecher's coefficients were frequently used in estimating immediate settlements of buildings in different codes and manuals. Yegorov's elastic solution has also been used in several domestic codes formulated recently, in which the deformation modules will be unavoidably employed. Because the difficulties in deriving the deformation modules E_0 from either laboratory or in situ tests, limited amount of data is reported in the literature. The nonlinear behavior of equivalent deformation modules $E_{0\cdot eq}$ derived from plate loading tests performed on three main types of soils in Beijing area was studied in this paper using the $p-s$ curves and their characteristic values. Mathematical expressions for the equivalent deformation modules varying with pressure p were established.

Key words plate loading tests, recently deposited clayey soils, clayey soils, sands, equivalent deformation modules.