

地基非线性沉降计算的原状土切线模量法

杨光华

(广东省水利水电科学研究院, 广东 广州 510610)

摘要: 根据原状地基的载荷试验曲线, 建立原状土的切线模量与应力水平关系的切线模量方程, 对地基不同点根据其应力水平由切线模量方程确定计算点原状土的切线模量, 用该切线模量对地基沉降进行分层总和法计算, 其特点是切线模量是由原位试验得到的, 能反映原状地基土的特点, 同时考虑应力水平的影响, 反映了土的非线性特点。

关键词: 切线模量; 原位载荷试验曲线; 分层总和法; 非线性; 原状土

中图分类号: TU433 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2006)11-1927-05

作者简介: 杨光华(1962-), 男, 教授级高级工程师, 博士, 博士生导师, 总工程师, 主要从事土的本构理论、深基坑工程、高层建筑基础工程和软土工程的科研及设计。

Nonlinear settlement computation of the soil foundation with the undisturbed soil tangent modulus method

YANG Guang-hua

(Guangdong Provincial Research Institute of Water Conservancy and Hydropower, Guangzhou 510610, China)

Abstract: According to the in-situ plate loading curves, the relation of the tangent modulus of undisturbed soil with the stress level was set up and then the undisturbed soil tangent modulus of different points in soil could be computed based on its stress level. Using this tangent modulus of undisturbed soil in the layer-wise summation method to compute the foundation settlements, it was shown that the results agreed well with the observations.

Key words: tangent modulus in-situ loading test curve; layer-wise summation method; nonlinear; undisturbed soil

0 前言

地基的沉降计算一直是土力学的主要问题, 其中最大的难度在于目前计算参数的取用, 尤其在反映原状土特性方面不是很理想。目前一般的地基沉降计算主要依靠室内试验的 $e-p$ 曲线所确定的参数, 但室内试验的参数往往受取样扰动的影响, 与实际原状土有较大的差距, 尤其是结构性较强的硬土。如广东地区大量存在的残积土或粉质粘土, 室内试验的压缩模量 E_{s1-2} 与原状土压板载荷试验的变形模量 E_0 相差较大, 甚至 $E_0 = (6 \sim 10) E_{s1-2}$ 。但按压缩模量 E_s 与变形模量的理论值, $E_0 = \beta E_s$, $\beta = 1 - \frac{2\mu^2}{1-\mu}$, μ 为泊松比。因此 $0 \leq \beta \leq 1$, $E_0 \leq E_s$, 理论结果与实际的结果是相反的。因此, 结构性较强的硬土, 采用压缩模量计算地基沉降与实际观测结果相差较大。

图1为某工程的典型地质剖面, 基础底面约在地面以下12m深处, 基底土层为粉质粘土层 Q^{el} , 标贯击数 $N = 11 \sim 20$ 击, 压缩模量 $E_{s1-2} = 4.3 \text{ MPa}$, 而压板试验的变形模量为 40 MPa , 约为压缩模量的10倍。两者差异较大且与理论结果相反, 主要是由于室内试

验与原位试验的差异, 说明原状土体的力学参数与室内试验参数差异是较大的。因此, 作为沉降计算, 如何采用原状土力学参数或把原状土的试验用于沉降计算是一个很有意义但仍是一个未很好解决的问题。广东省建筑地基基础设计规范^[1]、国家高层建筑箱形与筏形基础技术规范^[2]都把用变形模量进行沉降计算的方法列入了规范, 说明采用原状土变形指标进行沉降计算已得到认可。但目前变形模量的确定一方面是经验值, 如广东地区一般经验为把变形模量与标贯击数 N 建立经验关系, 或通过原位压板载荷试验, 取对应于地基承载力特征值所对应的变形模量值^[1]。实际上, 变形模量是随着基底应力的不同而变化的, 目前用原位压板试验反算的变形模量是按半无限线弹性体的 Businessq 解计算的, 其反映的是压板下土体总体的一种等效的指标, 并不是土体单元的变形指标。实际上, 在深部的土体其变形模量理应是埋深越大变形模量越大的, 目前的方法一般采用一个固定的变形模量值, 未能合理反映不同深度处变形模量的不同。同时压板

试验是小尺寸的试验, 如何把试验结果用于大尺寸的基础沉降计算还需要深入研究。同时真实地基的沉降过程是非线性的, 因此, 仅用单一的变形模量显然无法真实模拟地基直到极限状态时全过程的沉降计算。文献[3]为了将原位压板试验结果应用于基础沉降计算, 提出了一个弦线模量法, 较好地应用原状土参数的思想, 直接利用压板试验曲线来确定土体的弦线模量, 以取代分层总和法中的压缩模量, 该方法的参数来源于原状土的原位试验, 对于硬土地基比采用室内试验参数应符合实际, 但弦线模量的取值仅取决于荷载扩散后不同深度处的 p 值, 在反映应力水平的影响方面仍不够。其实土体之所以产生非线性变形, 主要是应力水平的影响。如图 2 所示。

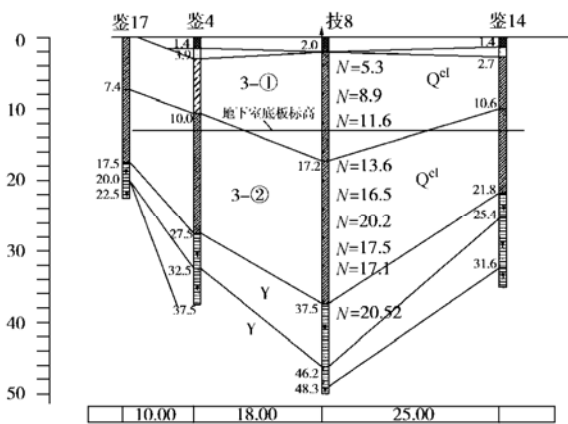


图 1 某工程典型地质剖面

Fig. 1 The geological profile of the foundation

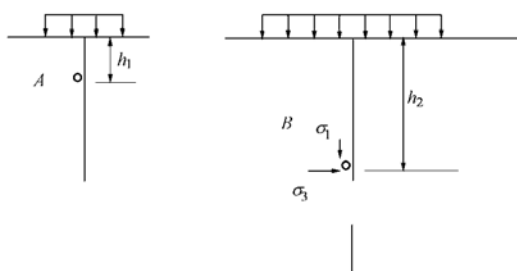


图 2 相同垂直附加应力点的不同应力水平

Fig. 2 Different stress levels for the points with the same additional vertical stress

两个基础面积不同, 一个大面积, 一个小面积, 在基础中线以下某深度处 h_1 的 A 点和 h_2 的 B 点, 其附加垂直应力均为 σ_1 , 但由于所处深度 $h_1 < h_2$, 即大面积基础下的 B 点埋深大于小面积基础下的 A 点, 虽然两点的垂直附加应力 σ_1 相同, 但 B 点的围压 σ_3 要大于 A 点的围压 σ_3 , 用该点处的应力水平, 即应力差 $\sigma_1 - \sigma_3$ 相比, 则 B 点的应力水平要小于 A 点的应力水平, 因而 B 点的变形模量要大于 A 点的变形模量才是合理的。因此, 真正反应土体的变形模量应主要是受

应力水平的影响, 而不仅是附加垂直应力 σ_1 。其实, 压板试验的 $p-s$ 曲线反映的不仅是荷载 p 对沉降的影响, 在非线性阶段影响其非线性沉降的主要因素应是应力水平。因此要获得合理的沉降计算模量, 应采用应力水平指标来确定更合理。本文根据原位压板试验的 $p-s$ 曲线, 建立用应力水平指标来确定单元土体的切线模量, 以取代传统的压缩模量, 用于分层沉降计算。由于切线模量源于原状土的压板试验曲线, 因而是一个能更好反映原状土变形特性的沉降计算方法。

1 原状土的切线模量法

在某一荷载 p_i 时增加增量荷载 Δp_i , 则某深度 h_j 处分层厚度为 Δh_j 的土层产生的沉降可近似计算为

$$\Delta s_{ij} = \frac{\Delta p_i \alpha \cdot \Delta h_j}{E_{ij}} \quad (1)$$

式中 E_{ij} 为对应 p_i 在 h_j 处原状土的等效切线模量; 假设增量荷载 Δp 过程中土体的变形是线性的; α 为应力分布系数; $\Delta p_i \alpha$ 表示 Δp_i 在 h_j 处所产生的应力增量; Δh_j 为土层分层厚度; Δp_i 所产生的沉降可按分层总和法确定为

$$\Delta s_i = \sum_{j=1}^n \Delta s_{ij} \quad (2)$$

该计算式的关键是 E_{ij} 的确定。根据土的本构特性, E_{ij} 应主要取决于该点处的应力水平, 室内土样试验可按 Duncan-Chang 模型确定, 但对于原状土, 是否可以从原位压板试验的 $p-s$ 曲线来确定原状土的切线模量? 显然, 压板试验的 $p-s$ 曲线是一个边值问题, 而不是一个单元应力问题, 要确定单元参数需要把边值问题与单元参数建立起联系。

一般可假设土体的压板试验 $p-s$ 曲线为一双曲线方程^[4-5], 即

$$p = \frac{s}{a + bs} \quad (3)$$

该曲线任意点的切线导数为

$$\frac{dp}{ds} = \frac{(1-bp)^2}{a} \quad (4)$$

由式 (3) 可知, 当 $s \rightarrow \infty$ 时, $b = \frac{1}{p_u}$ (p_u 为压板试验的极限荷载)。曲线的初始切线模量^[4]

$$a = \frac{D(1-\mu^2)\omega}{E_0} \quad (5)$$

式中, D 为试验的压板直径, μ 为土的泊松比, ω 为系数, E_0 为原状土的初始切线模量。式 (4) 的导数是 $p-s$ 曲线的切线模量, 不是土体的切线模量。假设在某一荷载 Δp 下为增量线性, 则对压板试验引起的沉降增量按半无限弹性体的 Bussinesq 解为

$$\Delta s = \frac{D\Delta p(1-\mu^2)}{E_t} \omega \quad (6)$$

E_t 为压板底部对应某一荷载 p 处增加一增量荷载 Δp 时的土体等效切线模量, 则

$$E_t = \frac{\Delta p}{\Delta s} D(1-\mu^2) \omega \quad (7)$$

令 $\frac{\Delta p}{\Delta s} = \frac{dp}{ds}$, 把式 (3)、(5) 代入式 (7), 得压板底处土体的切线模量

$$E_t = (1 - \frac{p}{p_u})^2 E_0 \quad (8)$$

引入一个破坏比系数 R_f , 则式 (8) 可改写为

$$E_t = (1 - R_f \frac{p}{p_u})^2 E_0 \quad (9)$$

式中, p/p_u 是压板底面处所受压力 p 与极限荷载 p_u 的比值, 反映了土体应力水平对土体切线模量的影响。式 (9) 表明, 土的切线模量取决于 p/p_u 比值, 而不仅仅取决于 p 值, 因此, 对于图 2 中 A、B 点, 虽然扩散后的垂直附加荷载 p_1 (或垂直应力 σ_1) 相同, 但 B 点埋深大, 因而对应点的 p_u 大, 则由式 (9) 可知 B 点的 E_t 大于 A 点的 E_t , 这是符合一般认识的。因此, 考虑应力水平影响确定切线模量 E_t 更符合实际。对于不同基础、不同深度, 随着深度的增加, 基底应力扩散后的附加应力越少, 而极限荷载大, 则相应的切线模量也就越大, 因而随着深度的增加, 沉降收敛会越快。

2 应用和验证

压板试验的 $p-s$ 曲线是一个边值问题, 当采用分层总和法计算压板试验的 $p-s$ 曲线时, 关键是要合理确定土体不同位置处土体的切线模量, 为检验以上方法的正确性, 可以对一个压板试验的 $p-s$ 曲线根据试验曲线确定 E_0 、 p_u 值, 再由式 (9) 可得反映不同荷载水平的土体切线模量, 以其代替传统分层总和法的压缩模量, 采用分层总和法, 如公式 (1)、(2), 计算压板荷载下的 $p-s$ 曲线, 与实测的 $p-s$ 曲线进行比较, 从而检验方法的可行性。

图 3 为在基础基底面高程进行的三个压板试验所得的 $p-s$ 曲线 (直径 $D = 80$ cm 的圆形压板), 为确定式 (9) 的 E_0 及 p_u 值, 以 #3 试验点的曲线来确定有关参数。式 (3) 可改写为

$$\frac{s}{p} = a + bs \quad (10)$$

对 #3 试验点拟合式 (10) 方程为

$$\frac{s}{p} = 0.000987s + 0.007795 \quad (11)$$

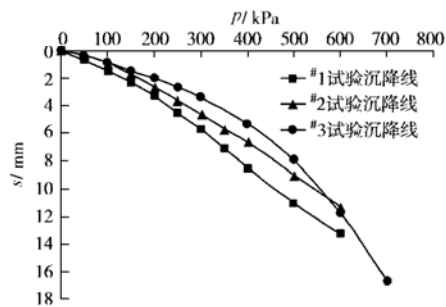


图 3 压板荷载试验 $p-s$ 曲线

Fig. 3 The in-situ plate loading test curve

如图 4 所示, 可得 $a = 0.007795$, $b = 0.000987$,

$$E_0 = \frac{D(1-\mu^2)\omega}{a} = \frac{0.8 \times (1-0.3^2) \times 0.79}{0.007795} = 73.78 \text{ MPa},$$

$$p_u = \frac{1}{b} = 1013 \approx 1000 \text{ kPa}.$$

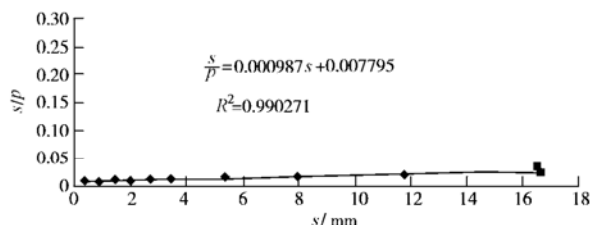


图 4 #3 试验点 $p/s-s$ 关系线

Fig. 4 The relations of $p/s-s$ for test #3

根据 Prandtl 地基承载力公式, 假设 $\varphi = 25^\circ$, 可以反算土的 c 值。

$$p_u = \frac{1}{2} \gamma b N_\gamma + q N_q + c N_c \quad (12)$$

其中, $N_\gamma = 15.2$, $N_q = 10.7$, $N_c = 20.7$, $\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$, $b = 0.8 \text{ m}$, $q = 0$ 。

把 $p_u = 1000 \text{ kPa}$ 代入式 (12), 则可得 $c = 42.4 \text{ kPa}$, 对于不同深度处, p 值按圆形荷载下弹性应力分布求得, p_u 值按 c , φ 值用 (12) 式考虑埋深时 $q = \gamma h$ 的影响而可求得, 分层土层厚度取为 0.5 m , 按式 (9) 确定不同深度处土体的切线模量, 按分层总和法仅考虑竖向应力引起的沉降, 即按式 (1) 计算各分层的增量沉降。对 #3 试验点, 分别取 $R_f = 0.8$ 、 0.9 、 1.0 进行比较如图 5 所示。对各压板试验点取 $R_f = 1.0$ 时的计算沉降与实测沉降比较如图 6 所示, 由图可见, 计算与实测值是接近的, 且可以计算荷载直至接近破坏的全沉降过程, 可以反映非线性的沉降过程, 从 #3 试验点求得的参数用于 #3 点的计算, 计算值略大于实测值, 说明方法是偏安全的。

某工程典型地质剖面如图 1 所示, 基坑开挖深度约 12 m , 建筑物地面以上 12 层, 地下室 2 层, 原设计采用人工挖孔桩至微风化岩, 但考虑到底板已置于

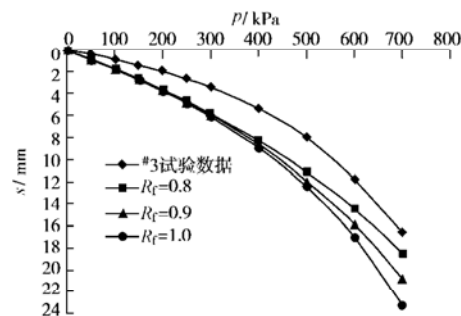


图 5 R_f 不同取值时计算沉降与实测沉降比较

Fig. 5 The comparison of the computed results with the test results for different R_f

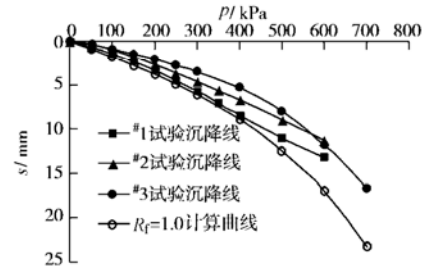


图 6 计算的沉降曲线与试验曲线的比较

Fig. 6 Comparison between the computed and test results

较好的土层，可考虑采用筏板，但由于底板下土层的压缩模量 3-①层土的压缩模量为 4.33 MPa，地质报告推荐承载力 $f_k = 160 \sim 120$ kPa，3-②层土的压缩模量为 4.4 MPa，地质报告推荐承载力 $f_k = 240 \sim 260$ kPa，设计要求基底应力 $p = 276$ kPa，用压缩模量进行分层沉降计算时，沉降量达 880 mm，因而，按此值难以设计成筏板基础。

我们认为 3-①和 3-②土层是较好土层，采用筏板是可行的。为进一步论证，对底板处土层进行了 3 个压板载荷试验，试验结果为图 3 所示。由试验结果可见，地基极限承载力大于 700 kPa，再考虑补偿效应，承载力是没有问题的，关键是沉降量。采用以上的切线模量法和所求得的相关参数，基础面积近似按 40 m × 40 m 方形考虑，实际基底应力按每层 15 kPa，按 14 层考虑，则按 $p = 210$ kPa 计算沉降，按分层总和法计算，分层厚度按 1 m 考虑，荷载增量分级取 $\Delta p = 15$ kPa，计算深度至基础底以下 20 m，20 m 以下为强风化岩面，岩层的沉降不计。对筏板中间最大可能沉降点，计算了 $R_f = 1.0$ 、0.9、0.8 的情况，若考虑刚性基础，新方法和规范方法均按方形刚性基础考虑，将最大沉降点的沉降量乘以 0.88，与竣工时的平均观测沉降比较如下表 1 所示。

筏板各测点的沉降和图 1 的地质剖面位置如图 7 的 2-2' 所示。由以上计算结果可见，用这种新方法计算的沉降量与实测结果较接近，而用压缩模量 E_s

按规范的分层总和法计算的沉降则明显偏大很多，说明新方法是符合实际的。

表 1 计算沉降与实测平均沉降比较

Table 1 Comparison between the computed and measured settlements

实测平均 沉降/mm	计算沉降/mm			计算用 E_s /MPa
	$R_f=1.0$	$R_f=0.9$	$R_f=0.8$	
40	46.6	46.5	46.4	774.4

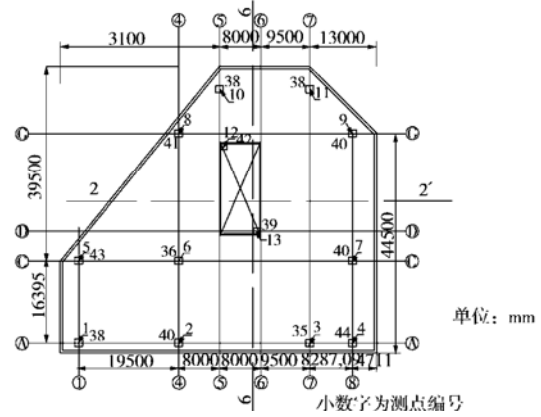


图 7 实测的基础沉降及地质剖面位置

Fig. 7 The observed results of the foundation settlement and the location of geological profile

3 结 论

地基沉降计算关键在于原状土体参数的获取。土的本构理论虽已取得很大进步，但仍无法较好解决原状土参数的获取问题，制约着土力学理论的发展。本文利用原位压板试验建立的，以应力水平来确定原状土切线模量的方法，较好地获得原状土体的切线模量，用于地基沉降计算具有较好的精度和合理性。通过假设压板试验 $p-s$ 曲线为一双曲线方程，所需参数简单，易于确定，通过进一步的完善和积累经验将可较好地用于解决地基的沉降计算问题。

致 谢 有关计算得到研究生王鹏华、乔有梁的协助，在此表示感谢！

参考文献:

[1] DBJ15—31—2003 建筑地基基础设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003.(DBJ15—31—2003 Code for design of building foundation [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2003.)

[2] JGJ6—99 高层建筑箱形与筏形基础技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999.(JGJ6—99 Technical code for building box foundation raft foundation[S]. Beijing: China

Architecture & Building Press, 1999.)

- [3] 焦五一. 地基变形计算的新参数—弦线模的原理和应用[J]. 水文地质与工程地质, 1982(1): 30 - 33.(JIAO Wu-yi. The principle of the chord modulus method and its application—a new parameter for computing the foundation settlement[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 1982(1):30 - 33.)
- [4] 杨光华. 残积土上基础非线性沉降的双曲线模型的研究[C]//第七届全国岩土力学数值分析与解析方法讨论会论文集. 大连: 大连理工大学出版社, 2001: 168 -

171.(YANG Guang-hua. A study on hyperbolic model for estimating nonlinear settlement of foundation on residual soil[C]// Proceeding of the Seventh National Conference on Numerical Analytical Methods in Geomechanics, Dalian, P.R. China. Dalian: Dalian University of Technology Press, China, 2001:168 - 171.)

- [5] 杨光华. 基础非线性沉降的双曲线模型法[J]. 地基处理, 1997(1):50 - 53.(YANG Guang-hua. The hyperbolic model for estimating nonlinear settlement of foundation[J]. Groun Improvement, 1997(1):50 - 53.)

中国土木工程学会 第十届中国土力学及岩土工程学术会议 (第一号通知·征集论文)

第十届中国土力学及岩土工程学术会议将于 2007 年 11 月 1~4 日在重庆隆重召开!

本次会议由 中国土木工程学会土力学及岩土工程分会主办, 中国人民解放军后勤工程学院和重庆市土木建筑学会承办。会议期间将举行中国土木工程学会土力学及岩土工程分会成立 50 周年庆典活动, 众多岩土工程界的老前辈和著名专家学者将出席会议, 是岩土工程界的又一次学术盛会。

当前是我国工程建设飞速发展的黄金时期, 各种大型工程的建设规模之宏伟、投资金额之巨大、建设势头之迅猛是史无前例的。南水北调、西电东送、西气东输、青藏铁路、城市地铁、高速公路、高速铁路、高土石坝、填海造陆、超高建筑等重大工程, 提出了许多新的土力学及岩土工程问题, 第十届学术会议将以“地质灾害与岩土工程创新”为主题, 对近年来在土力学与岩土工程领域的最新研究进展进行广泛的学术交流。

会议以科学发展观为指导, 主要研讨土力学及岩土工程的基本理论、实践探索、新技术和新方法等, 具体内容包括: 岩土的基本性质和测试技术、基础工程、地基处理、地下工程及深基坑、土工建筑物与边坡、土动力学及地震工程、特殊土与非饱和土、环境岩土工程、岩土工程中的新技术与新材料、岩土工程中的信息化技术、重大工程实录、地质灾害与防治、西

南地区重大与特殊岩土工程问题等。

本次会议论文集将由重庆出版社正式出版。热忱欢迎岩土工程各个领域的研究、设计、施工人员踊跃投稿。要求应征论文未在国内外刊物或论文集发表过, 论文按照《岩土工程学报》论文模板撰写, 字数控制在 6000 字(包括图表)以内。来稿请注明作者详细通讯地址、E-mail 及联系电话。

请与 2007 年 3 月 31 日前提交论文全文, 2007 年 5 月 15 日前通知是否录用, 2007 年 6 月 30 日前提交修改后的论文。要求寄一份正式稿件给会务组, 同时以电子邮件或磁盘方式向会务组提供电子文件。

会议于 2007 年 11 月 1~4 日在重庆举行, 11 月 1 日会议报到, 11 月 2~4 日开会, 11 月 5 日组织考察。

会议期间将举行岩土工程仪器、设备、机械、新材料、软件等展览, 欢迎有关厂商参展。

联系人: 李秀地 博士

地址: 重庆市渝州路 79 号解放军后勤工程学院建筑系地下工程教研室 (400041)

E-mail: librte@163.com, librte@sohu.com

电话: 023-68598052 13508386471

传真: 023-68598052

(陈正汉 供稿)