

DOI: 10.11779/CJGE2020S1008

基于旁压试验获得计算参数的非线性沉降计算方法

张玉成¹, 胡海英¹, 杨光华^{2, 3}, 钟志辉², 刘琼⁴, 刘翔宇⁵

(1. 华南农业大学水利与土木工程学院, 广东 广州 510642; 2. 广东省水利水电科学研究院, 广州 510610; 3. 广东省岩土工程技术研究中心, 广东 广州 510610; 4. 广东水利电力职业技术学院, 广东 广州 510610; 5. 中国核电工程有限公司, 北京 100840)

摘要: 在常规的地基沉降计算方法中, 通常由于室内试验确定的计算参数与实际土体参数存在一定的误差, 导致理论计算结果与实际沉降相差较大。为了解决问题, 考虑地基沉降的非线性, 采用原位试验确定计算参数是一个可行的办法。旁压试验不仅操作简单、费用低, 而且能测得不同深度的土体参数。在前人已有的研究成果基础上, 研究了基于旁压试验获得沉降计算参数的非线性沉降计算方法。主要内容和成果有: ①对目前常用沉降计算方法存在的不足和计算结果精度不高的原因进行了分析总结; ②根据旁压试验的受力特点、原理及旁压孔壁土体应力分布规律, 假定土体服从M-C屈服准则, 从理论上推导沉降计算中需要的岩土体参数 E_{10} , c , φ ; ③基于杨光华提出的非线性切线模量法, 推导并给出了利用旁压试验成果计算地基非线性沉降的原理和步骤; ④结合具体工程实例, 验证了该方法, 并与规范方法中分层总和法的结果进行了对比分析, 结果表明基于原位测试结果确定岩土体参数的沉降计算值更符合实际。由于旁压试验在不同深度能够考虑土的非线性和土体剪切变形引起的沉降, 通过这项探索性的研究为今后利用原位试验结果计算地基变形打下了基础, 也为实际工程的计算分析提供借鉴。

关键词: 旁压试验; 原位土力学; 切线模量法; 非线性; 沉降计算

中图分类号: TU431 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2020)S1-0038-07

作者简介: 张玉成(1975—), 男, 内蒙古武川人, 博士后, 教授, 从事岩土工程方面的教学和科研工作。E-mail: 125340752@qq.com。

Non-linear settlement calculation method based on soil parameters obtained from pressuremeter tests

ZHANG Yu-cheng¹, HU Hai-ying¹, YANG Guang-hua^{2, 3}, ZHONG Zhi-hui², LIU Qiong⁴, LIU Xiang-yu⁵

(1. College of Water Conservancy and Civil Engineering South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China; 2. Guangdong Research Institute of Water Resources and Hydropower, Guangzhou 510610, China; 3. The Geotechnical Engineering Technology Center of Guangdong Province, Guangzhou 510610, China; 4. Guangdong Institute of Water Resources and Electric Power, Guangzhou 510610, China; 5. China Nuclear Power Engineering Co., Ltd., Beijing 100840, China)

Abstract: In the conventional calculation method for foundation settlement, there is a certain error between the calculation parameters determined by laboratory tests and the actual soil parameters, which leads to a large difference between prediction and reality. To overcome this shortcoming and consider the nonlinearity of foundation settlement, it is feasible to determine the calculation parameters by in-situ tests. The pressuremeter tests are easy to operate and low cost and can be used to measure the soil parameters at different depths. Therefore, on the basis of the previous research results, a non-linear settlement calculation method based on the calculation parameters obtained from the pressuremeter tests is studied. The main contents and achievements are as follows: (1) the shortcomings of the current commonly used settlement calculation methods and the reasons for the low accuracy of the calculated results are analyzed and summarized. (2) According to the stress characteristics and principles of the pressure meter tests, and the distribution laws of soil stress of the pressure meter hole wall as well as the M-C yield criterion, the parameters E_{10} , c and φ needed in the settlement calculation are derived theoretically. (3) According to the non-linear tangent modulus method proposed by Yang Guang-hua, the principle and procedure of calculating the nonlinear settlement of foundation based on the results of pressuremeter tests are derived and given. (4) The proposed method is verified through projects, and the results are compared with those predicted by the codes (layer-wise summation method). The comparison shows that the prediction based on the parameters derived from in-situ tests is closer to the real settlement. Because

基金项目: 国家自然科学基金项目(51378131, 51778152); 广东省水利科技创新基金项目(2009-25)

收稿日期: 2020-06-02

the nonlinear soil and the settlement caused by shear deformation of soil can be considered in the pressuremeter tests at different depths, this exploratory study lays a foundation for the calculation of foundation deformation by the results of in-situ test in the future. It can also be regarded as a reference for other projects.

Key words: pressuremeter test; in-situ soil mechanics; tangent modulus method; non-linearity; settlement calculation

0 引言

由于岩土体的复杂性和参数的误差, 地基沉降计算问题一直没有得到很好的解决。常用的沉降计算方法一般是根据室内土样压缩试验所得的土体压缩曲线进行计算。这种方法虽简便, 但理论上存在两大不足: 一是取土时会产生土样扰动; 二是试验的应力、变形条件与实际地基的受力状态不尽相同, 使得试验结果的误差难以估计。《建筑地基基础设计规范: GB50007—2011》^[1]采用了 0.2~1.4 的经验系数来对计算结果进行修正, 修正系数不仅差异变动大, 且要求工程师有一定的工程经验, 往往不能确切掌控地基的实际沉降值。

近几年, 有学者开展了采用原位测试成果来进行地基沉降的研究^[2-5]。文献[2]利用压板试验曲线, 建立了切线模量法地基非线性沉降计算方法, 该方法能反映地基土的原状性和沉降变形的非线性, 工程实践验证计算精度较好; 文献[4]在文献[2]基础上提出了割线模量计算方法; 文献[6]利用三轴试验和旁压试验结果计算了碎石桩的荷载沉降关系曲线; 文献[7]用旁压试验推演了地基土的 $p-s$ 曲线, 并能考虑土体应力水平和非线性; 文献[8]用旁压试验成果推导了土体强度参数的公式, 将旁压间接指标转化成强度指标。

目前原位测试获取岩土体参数优势逐渐被大家认可, 且旁压试验已成为一种比较成熟的原位测试方法^[9]。因此, 本文在总结目前地基沉降计算方法存在的问题和旁压试验的工作原理基础上, 根据应力扩展理论和 M-C 屈服条件, 用旁压测试结果推导了获得岩土体的强度参数 (黏聚力 c , 内摩擦角 φ) 和变形参数 (变形模量 E) 的计算公式, 并利用切线模量法和规范的分层总和法建立了利用旁压成果计算地基非线性沉降的方法, 最后利用工程案例对该方法的合理性进行了验证。

1 地基沉降计算存在的问题

目前地基沉降计算方法主要有三大类: 压缩模量法 (以分层总和法为代表)、弹性法 (弹性力学沉降解为算法) 以及有限元数值计算方法。

1.1 分层总和法存在的问题

大量的沉降实测资料表明分层总和法的计算值和实测值有较大差异: 地基土为硬土时, 计算值大于实

测值; 反之, 地基土为弱土, 计算值小于实测值。导致沉降计算值误差较大的主因是: ①分层总和法公式的理论假定条件不符合地基土的实际情况, 即假定地基土不发生侧向变形, 只发生竖向压缩变形, 尤其对于浅层土和软土这个假定与实际状态差异更大。②附加应力是按 Boussinesq 解计算, 利用中心点处的附加应力处迭加求得, 不能代表整个地基土的实际附加应力; 此外假定基础为柔性, 而实际基础刚度很大, 对沉降有明显调节作用。③计算参数主要通过室内试验来确定, 不仅应力状态与实际不符, 且取样扰动及压缩试验精度都会带来误差。

近几年, 有些学者对这些问题给出了提高精度的修正和改进方法, 但一直没有得到很好的解决。

1.2 规范方法存在的问题

中国规范方法^[1]是在理论计算结果上, 乘以变化范围为 0.2~1.4 的经验系数 ψ_s (见表 1) 来进行修正的。

表 1 规范沉降计算方法中的经验系数 ψ_s

Table 1 Empirical coefficients for settlement calculation from China's code

| 附加应力 | E_s/MPa | | | | |
|---------------------|------------------|-----|-----|-----|-----|
| | 20 | 15 | 7 | 4 | 2.5 |
| $p_0 \leq 0.75 f_k$ | 0.2 | 0.4 | 0.7 | 1.0 | 1.1 |
| $p_0 \geq f_k$ | 0.2 | 0.4 | 1.0 | 1.3 | 1.4 |

注: p_0 为基底的附加应力, E_s 为土的压缩模量。

规范方法^[1]存在以下不足及需要完善的问题:

(1) 理论计算结果需乘以一个 0.2~1.4 范围的经验系数进行修正, 其最大最小值相差达 7 倍, 对于经验不足的工程师确定该经验系数较为困难。

(2) 变形参数取值问题。公式中采取的土压缩模量是由侧限条件测得的, 其未能考虑剪切变形产生的沉降, 参数取值引起的误差原因见图 1, 2。根据 $e-p$ 曲线可知, 具有侧限土的压缩性随压力增大而降低, 但根据荷载试验 $p-s$ 曲线, 当荷载超过比例极限, 沉降随着压力的增大沉降量增加更快, 所以两种方法得出的结论相反。从图 2 可知, 随着荷载的增大, 两种测试方法的结果差距会越来越大, 同时也说明, 基础随着荷载的增大而产生的沉降主要是由土的剪切变形所产生。

(3) 参数测试方法问题。现在沉降计算的参数大部分是通过室内土样所得到的, 但室内土样与现场原

位土变形特性不同。理论上,土体的压缩模量 E_s 应该大于变形模量 E_0 ,但实际中对于结构性比较强的硬土一般 E_0 大于 E_s ,这种现象产生的原因主要是取样、制样的扰动影响。室内试验统计得到的广东花岗岩残积土的 $E_0=(5\sim 10)E_s$ [2]。

综上所述,室内试验不仅难以克服土样扰动的影响,且不能很好地反映土的原状性,在这种情况下,即使采用现代数值分析方法和合理的本构模型也难以准确计算地基变形。因此,为了提高地基沉降计算的精度,首要任务应是改进土体参数的获取方法,测得的参数更真实地反映工程实际土性。

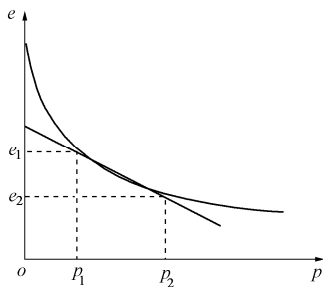


图1 压缩试验的 $e-p$ 曲线

Fig. 1 $e-p$ curves from compression tests

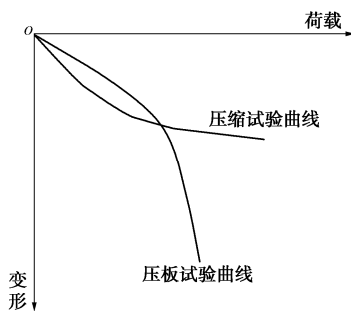


图2 不同试验的 $p-s$ 曲线

Fig. 2 $p-s$ curves from different tests

2 非线性切线模量法沉降计算原理

常用沉降计算方法中采用的变形参数难以反应土的非线性与原状性,非线性切线模量法中岩土体参数利用原位试验确定,然后用于分层总和法来计算沉降,但公式中变形参数与常规方法的意义不同 [10]。该方法的核心思想是假定荷载-沉降曲线为双曲线,令

$$p = \frac{s}{a + bs}, \quad (1)$$

式中, a, b 为常数,当荷载达到极限承载力 p_u 时, $s \rightarrow \infty$,由式 (1) 取极限可得

$$b = \frac{1}{p_u}. \quad (2)$$

利用均质弹性半无限空间的 Boussinesq 解,基础的沉降为

$$s = \frac{pB(1-\nu^2)}{E} \omega, \quad (3)$$

式中, E 为杨氏模量, ν 为泊松比, B 为基础宽或直径, ω 为形状系数。式 (1) 可表示为 $s/q=a+bs$, 加载开始时, $s \rightarrow 0$, $s/q=a$, 此时对应的弹性模量称初始切线模量,用 E_{t0} 表示,对比式 (3) 可得

$$a = \frac{B(1-\nu^2)}{E_{t0}} \omega. \quad (4)$$

考虑地基 $p-s$ 曲线的非线性,地基在加载过程中,变形模量是变化的,用 E_t 表示,分别对式 (1), (3) 求切线倒数:

$$\frac{dp}{ds} = \frac{(1-bp)^2}{a}, \quad (5)$$

$$\frac{dp}{ds} = \frac{E_t}{B(1-\nu^2)\omega} = \frac{E_t}{aE_{t0}}. \quad (6)$$

由式 (5) 和 (6) 得

$$E_t = \left(1 - \frac{p}{p_u}\right)^2 \cdot E_{t0}. \quad (7)$$

考虑试验确定的 p_u 值比实际值偏小,参照邓肯-张模型,采用破坏比系数 R_f 来反映,可得原状土的切线模量计算公式 [10]:

$$E_t = \left(1 - R_f \frac{p}{p_u}\right)^2 \cdot E_{t0}, \quad (8)$$

式中, E_{t0} 为材料常数,如果岩土体的应力状态确定,其值为定值。式 (8) 说明,采用分层计算地基沉降时,随埋深增加,极限承载力 p_u 随着埋深的增加而增大, E_t 也非线性增加,这点是规范方法没有考虑的。

用式 (8) 计算得到 E_t 代替规范分层总和法中的压缩模量 E_s ,就是本文所用的非线性切线模量法。该方法所需参数较简单,只要有 E_{t0} , c , φ 即可计算基础的非线性沉降。下面通过旁压试验成果推求出 E_{t0} , c , φ 这 3 个参数。

3 利用旁压试验推导沉降计算参数

3.1 旁压试验简介

旁压试验是通过一定长度的一个圆柱体在孔中加压,孔壁施加横向压力,使土体产生径向变形的原位测试方法,可以得到土体压力与土体体积两者之间变化关系曲线,利用曲线可以确定土体旁压模量、地基承载力、土体参数及地基反力系数等。旁压试验柱状孔穴模型示意图见图 3。

3.2 旁压试验原理及基本假定

本文主要目的是通过旁压试验测试结果获得沉降

计算所需的原位参数, 在进行旁压受力分析时, 通常做的基本假定为^[11]: ①旁压孔周围岩土体为均质无限体, 孔穴扩张为平面应变状态; ②旁压孔周围岩土体介质为各向同性和弹塑性; ③岩土体介质连续且满足平衡状态; ④旁压孔加载扩张时, 能用增量弹性理论描述旁压孔周围岩土体的应力应变关系, 且满足 M-C 屈服条件。

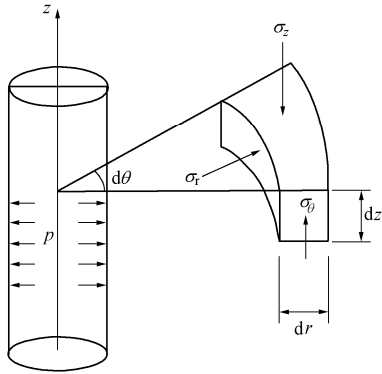


图 3 旁压试验的柱状孔穴模型示意图

Fig. 3 Illustration of cylinder model for pressuremeter tests

3.3 利用旁压试验结果推导沉降计算参数

(1) 推求土的强度参数

规范中用旁压试验测定土强度方法主要以经验公式为主, 从理论上推到的计算方法较少, 如《岩土工程勘察规范: DGJ 08—37—2002》^[11]给出的公式如下:

$$C_u = \frac{p_l - p_0}{N_p} \quad (9)$$

式中, $N_p=6.18$ 。王长科^[8, 12]给出了砂土的内摩擦角的估计公式:

$$\varphi = \arcsin\left(\frac{p_f}{p_0} - 1\right) \quad (10)$$

下面根据旁压试验的原理和测得的结果来推导沉降计算参数, 假定旁压孔周围土体符合 3.2 节的假定。当孔壁压力 p 增加时, 孔洞扩张, 土体屈服进入塑性状态, 满足 M-C 屈服准则, 屈服条件用主应力表示为 (土压力取为正):

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = c \cos \varphi + \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \sin \varphi \quad (11)$$

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= \Delta p \cdot \frac{r_0^2}{r^2} + p_0 \\ \sigma_\theta &= -\Delta p \cdot \frac{r_0^2}{r^2} + p_0 \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

根据式 (12), 利用边界条件 (孔壁处 $r=r_0$) 有:

$$\sigma_r = \Delta p + \sigma_{h0} \quad (13)$$

$$\sigma_\theta = -\Delta p + \sigma_{h0} \quad (14)$$

式中, p 为孔壁处作用的压力, Δp 为附加压力,

$\Delta p = p - \sigma_{h0}$, σ_{h0} 为土的初始水平应力。

a) 当旁压孔周围土体应力状态为第一塑性应力状态时, $\sigma_1 = \sigma_2 = q$ (q 为上覆压力), $\sigma_2 = \sigma_r$, $\sigma_3 = \sigma_\theta$ 。联解式 (11), (12), (14), 得

$$p_f = 2\sigma_{h0} + \frac{2c \cos \varphi}{1 + \sin \varphi} - q \frac{1 - \sin \varphi}{1 + \sin \varphi} \quad (p_f < q) \quad (15)$$

b) 随着压力增大, 最大主应力变为 σ_r , 塑性应力状态为第二塑性应力状态时, $\sigma_1 = \sigma_r$, $\sigma_2 = \sigma_2 = q$, $\sigma_3 = \sigma_\theta$ 。联解式 (11), (14), (15), 得

$$p_f = c \cos \varphi + \sigma_{h0}(1 + \sin \varphi) \quad (p_f \geq q) \quad (16)$$

c) 压力 p 进一步增加, 环向应力和径向应力增大, 当 $\sigma_r > \sigma_\theta > \sigma_z$ 时, 塑性应力状态为第三塑性应力状态, $\sigma_1 = \sigma_r$, $\sigma_2 = \sigma_\theta$, $\sigma_3 = \sigma_z = q$, 发生屈服时 p 即为旁压试验极限压力。联解式 (11), (13), (14), 得

$$p_L = \frac{2c \cos \varphi}{1 - \sin \varphi} + q \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \quad (17)$$

联解式 (15), (17) 得到

$$\varphi = \arcsin \frac{p_L - p_f + 2\sigma_{h0} - 2q}{p_L + p_f - 2\sigma_{h0}} \quad (p_f < q) \quad (18)$$

联立式 (16), (17) 得到

$$\varphi = \arcsin \frac{p_L - q + 2\sigma_{h0} - 2p_f}{p_L + q - 2\sigma_{h0}} \quad (p_f \geq q) \quad (19)$$

由式 (17), 经过三角函数变换, 得到

$$c = \frac{1}{2 \tan\left(45^\circ + \frac{\varphi}{2}\right)} \left[p_L - q \tan^2\left(45^\circ + \frac{\varphi}{2}\right) \right] \quad (20)$$

根据式 (18), (19) 和 (20) 可计算土体的强度参数^[15]。式中: p_f 为旁压试验中旁压孔孔壁土体塑性状态时压力; p_L 为旁压试验旁压孔孔壁土体的理论极限压力; q 为试验点竖向应力; σ_{h0} 为试验位置原位水平应力。

对于不符合 3.2 节基本假设的一般黏性土, 可根据地基承载力公式来反算岩土体的强度参数^[13], 利用旁压试验得到地基承载力标准值 f_k , 然后根据

$$f_k = 3M_r \cdot \gamma + 0.5M_q \cdot \gamma_0 + M_c \cdot c \quad (21)$$

结合经验假定 c 值后, M_r , M_a 和 M_c 可查表得到, 代入式 (21) 算出 φ 值。同样, 若假设 φ 也可算出 c 。

(2) 利用旁压试验曲线推求土的初始切线模量

图 4 是典型的旁压试验曲线, 旁压曲线可分为 4 个阶段: ①初始阶段 OA , 随旁压 p 增大, A 点对应初始压力 p_0 ; ②似弹性段 AB , p 与 V 基本呈线性关系, B 点对应初始压力 p_f ; ③塑性变形段 BC ; ④破坏阶段 CD , 最终压力为极限压力 p_L 。

文献^[15]根据平面应变问题, 给出了旁压模量弹性解:

$$E_m = 2(1+\nu) \left(V_c + \frac{V_0 + V_f}{2} \right) \frac{\Delta p}{\Delta V} \quad (22)$$

式中, V_c 为旁压测腔固有体积, 假定旁压曲线符合双曲线模型(ABCD段), 则有

$$E_{t0} = \frac{P_u}{(p_u - p_1)} E_m \quad (23)$$

旁压模量 E_m 实际上是旁压曲线中 AB 段的割线模量, A 点为起点, 初始压力 p_0 较小, 认为其对应的切线模量即为初始切线模量 E_{t0} ; 式(23)中 p_u 可以表示为 $(p_L - p_0)$, p_1 可以表示为 $(p_f - p_0)$, 则式(23)可表示为^[16]

$$E_{t0} = \frac{(p_1 - p_0)}{(p_1 - p_0) - (p_f - p_0)} E_m = \frac{(p_1 - p_0)}{(p_1 - p_f)} E_m \quad (24)$$

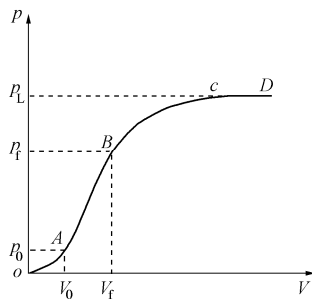


图4 旁压试验的 $p-V$ 曲线

Fig. 4 $p-V$ curves from pressuremeter tests

4 利用旁压试验成果进行沉降计算的方法与步骤

通常情况下可以利用现场压板试验确定切线模量法的计算参数, 但是压板试验只能做浅层土、难以做深层土的(深层载荷试验难度较大), 而旁压试验不仅操作简单, 费用比压板试验低, 而且它能测得地基中不同深度土体的参数。

本文利用杨光华^[2]提出的原状土切线模量法, 提出了利用旁压试验成果计算地基非线性沉降的方法。主要思路是: 沉降计算所需参数由旁压试验成果来推导出的公式得到, 沉降计算方法是非线性切线模量法, 具体方法和步骤如下^[16]: ①地质区间需要有旁压试验, 一般同一土层布置的测点不少于3个, 获得旁压试验原始数据后按照前面推导的方法求出每层土计算

沉降所需的参数。也可以利用旁压试验得到特征参数, 求出每层土体的 $p-s$ 曲线。②利用旁压试验结果求得切线模量法所需参数 E_{t0} , c , φ 后, 根据前面的计算公式可以得到对应土层的切线模量, 然后用分层总和法计算沉降, 将旁压试验得到的切线模量代替规范方法中压缩模量。③利用式(8)代替分层总和法的变形模量, 并采用分层总和法可以计算地基 $p-s$ 曲线, 如果有实测的 $p-s$ 曲线就可以对比分析, 从而检验方法的可行性。

5 工程实例验证

5.1 工程概况及地质条件

某工程由两栋30层住宅楼组成^[17], 二层地下室, 三层裙楼, 建筑物总高度94m, 地下室埋深10.5m, 地下室占地面积为3200m², 长81.4m, 宽41.4m, 底板厚1.60m。

工程地质条件: 场地自上而下的岩土层为: ①人工填土, ②冲积层, ③海积层, ④粉质黏土, ⑤坡积土, ⑥花岗岩残积砂质黏土, ⑦燕山期花岗岩, 典型地质断面见图5。基础底板主要位于土层⑥, 埋深在1.2~9.1m范围内, 该土层又细分为3个亚层: A、B、C, 该工程主要受力土层基本物理力学指标见表2。

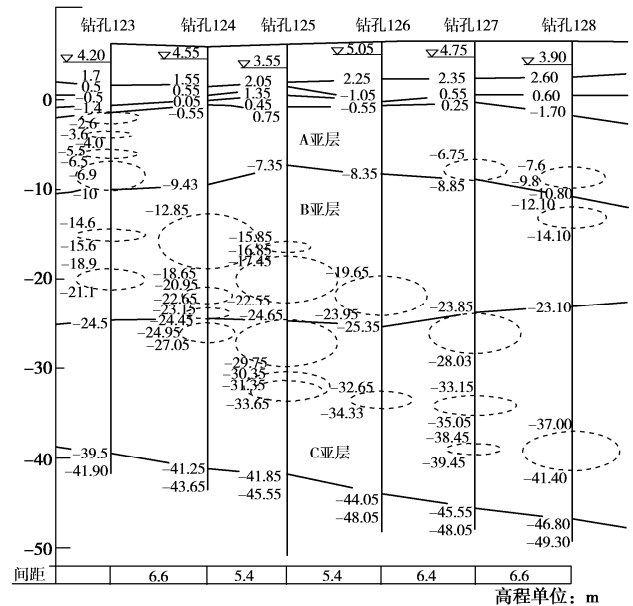


图5 工程典型地质剖面图

Fig. 5 Typical soil profile

表2 主要物理力学指标

Table 2 Major physical parameters of soil

| 花岗岩残基砂质黏土 | 天然重度 / (kN·m ⁻³) | 天然含水率/% | 液性指数 | 标贯击数 | 天然孔隙比 | 旁压模量 /MPa | 极限压力 /kPa | 压缩模量 /MPa | 变形模量 /MPa | 承载力 /kPa |
|-----------|------------------------------|---------|------|------|-------|-----------|-----------|-----------|-----------|----------|
| A 亚层 | 18.5 | 30 | 0.12 | 13 | 0.895 | 14.1 | 1088 | 5.4 | 12 | 250 |
| B 亚层 | 19.4 | 25 | 0.10 | 21 | 0.743 | 34.8 | 2163 | 6.2 | 25 | 300 |
| C 亚层 | 19.9 | 20 | 0.01 | 32 | 0.631 | 76.1 | 3668 | 7.0 | 38 | 400 |

5.2 规范方法计算的沉降^[16]

基础底面处自重应力为 104 kPa, 基底实测的土压力值为 150 kPa, 附加应力 p_0 为 46 kPa; 取一栋主楼进行计算 $B=40$ m, $L/B=1$, $Z_n=35$ m。

根据规范方法计算的基础中心沉降: $s=193.744$ mm。计算的压缩模量为 6.2 MPa, 规范公式中的沉降经验系数 ψ_s 为 0.78, 则基础中心的最终沉降修正为 151.1 mm。

5.3 本文方法计算的沉降

利用旁压试验实测数据计算 3 个亚层地基土的参数及 $p-s$ 曲线, 然后采用本文方法计算基础的沉降。旁压成果得到基础地板下 3 个亚层的 $p-s$ 曲线, 见图 6~8^[21], 旁压试验结果计算的 3 个亚层参数见表 3。

表 3 利用旁压结果计算的 3 个亚层参数

Table 3 Derived soil parameters for three sub-layers by pressuremeter tests

| 花岗岩残积砂质黏土 | 黏聚力 c/kPa | 内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$ | 初始切线模量 E_{t0}/MPa |
|-----------|--------------------|---------------------------|----------------------------|
| A 亚层 | 40.2 | 24 | 19 |
| B 亚层 | 56.0 | 26 | 30 |
| C 亚层 | 67.0 | 26 | 81 |

5.4 与实测结果对比分析

由前面计算结果可知, 规范方法计算的最终沉降为 151.1 mm, 利用旁压结果, 切线模量法计算的沉降为 38.8 mm, 主体建筑封顶后实测沉降平均值为 27.0 mm, 竣工后 18 个月实测沉降平均值约为 37.0 mm, 图 9 为实测的沉降曲线。

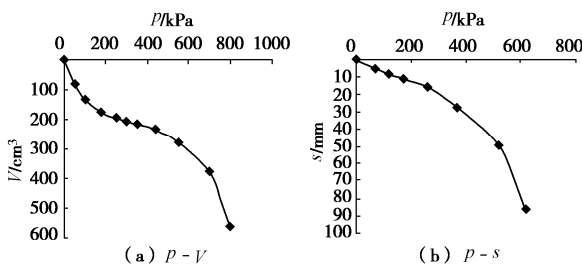


图 6 亚层 A 的旁压 $p-V$ 曲线与计算得到的 $p-s$ 曲线
Fig. 6 Comparison between $p-V$ curve from pressuremeter tests and corresponding $p-s$ curve predicted of a sub-layer A

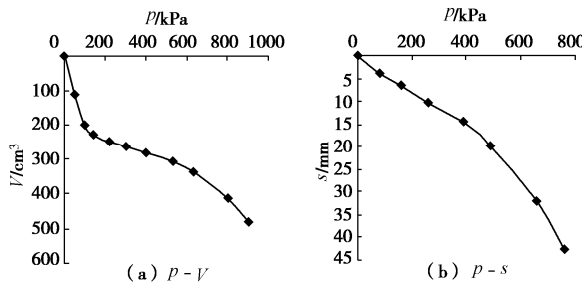


图 7 亚层 B 的旁压 $p-V$ 曲线与计算得到的 $p-s$ 曲线
Fig. 7 Comparison between $p-V$ curve from pressuremeter tests and corresponding $p-s$ curve predicted of a sub-layer B

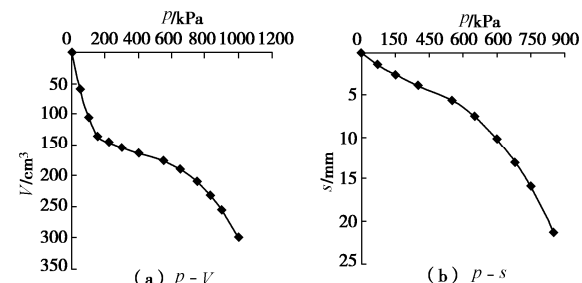


图 8 亚层 C 的旁压 $p-V$ 曲线与计算得到的 $p-s$ 曲线
Fig. 8 Comparison between $p-V$ curve from pressuremeter tests and corresponding $p-s$ curve predicted of a sub-layer C

利用非线性切线模量法计算地基沉降, 取破坏比 $R_f=1.0$, 分层计算时土层厚度取 0.5 m, 附加荷载增量 $\Delta p=15$ kPa, 因为 35 m 下为基岩, 所以计算深度取 35 m, 建筑物基础底附加应力为 46 kPa, 利用新方法计算的沉降 s 为 38.8 mm。

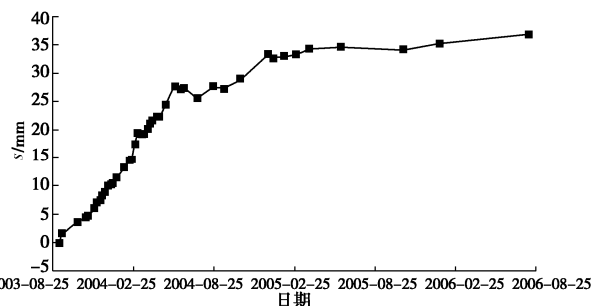


图 9 建筑物基础实测沉降时间 - 曲线
Fig. 9 Monitoring curve of foundation settlements with respect to time

综上所述, 基于旁压试验结果, 利用切线模量法计算的沉降值与实测结果接近, 而规范方法的结果与实测沉降量比较则明显偏大很多, 说明本文方法是符合实际的。误差的原因其实主要是参数的问题, 规范方法的压缩模量 E_s 远小于原位测试结果推导出的初始切线模量值。

6 结 语

岩土体本构关系的复杂性、参数的准确性影响着地基沉降计算的精度, 同时也是没有很好解决的土力学难题, 这直接制约着基础设计的合理性和设计水平。本文在综述目前沉降计算存在的问题的基础上, 给出了沉降计算不准确的原因, 提出了利用原位旁压试验成果确定沉降计算所需的岩土体参数, 引入杨光教授提出的切线模量法。这样不仅可以克服规范方法以室内试验确定参数带来的误差, 且切线模量法可以考虑地基土的应力水平的影响和非线性。旁压试验可以得到不同深度岩土体的参数, 使用简单方便, 便于推广和应用。因此, 进一步研究通过原位测试方法获取岩土体统参数的沉降计算方法, 计算的沉降精度提高后可以促进基础设计理论的发展和设计水平的提高。

参考文献:

[1] 建筑地基基础设计规范: GB5007—2011[S]. 2002. (Code

- for Design of Building Foundation: GB50007—2011 [S]. 2012. (in Chinese))
- [2] 杨光华. 地基非线性沉降计算的原状土切线模量法[J]. 岩土工程学报, 2006, **28**(11): 1927 - 1931. (YANG Guang-hua. Nonlinear settlement computation of the soil foundation with the undisturbed soil tangent modulus method[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, **28**(11): 1927 - 1931. (in Chinese))
- [3] 杨光华, 李思平, 杜秀忠, 等. 岩溶地区高层建筑基础筏板的工程实践[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, **25**(增刊2): 3363 - 3371. (YANG Guang-hua, LI Si-ping, DU Xiu-zhong, et al. Practice of high-rise building with raft foundation in karst region[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, **25**(S2): 3363 - 3371. (in Chinese))
- [4] 杨光华, 王鹏华, 乔有梁. 地基非线性沉降计算的原状土割线模量法[J]. 土木工程学报, 2007, **40**(5): 49 - 52. (YANG Guang-hua, WANG Peng-hua, QIAO You-liang. An undisturbed-soil secant modulus method for calculation of nonlinear settlement of soil foundations[J]. China Civil Engineering Journal, 2007, **40**(5): 49 - 52. (in Chinese))
- [5] 建筑地基基础设计规范: DBJ 15—31—2003[S]. 2003. (Design Code for Building Foundation: DBJ 15—31—2003[S]. 2003. (in Chinese))
- [6] 李广信, 蔡飞. 旁压试验在计算碎石桩荷载沉降关系中的应用[J]. 勘察科学技术, 1993, **6**: 30 - 34. (LI Guang-xin, CAI Fei. Application of side pressure test in calculating load settlement relation of gravel pile[J]. Site Investigation Science and Technology, 1993, **12**(2): 30 - 33. (in Chinese))
- [7] 刘琼, 杨光华, 李德吉. 用旁压试验结果推算载荷试验 $p-s$ 曲线[J]. 广东水利水电, 2008(8): 82 - 82. (LIU Qiong, YANG Guang-hua, LIU Peng. Nonlinear settlement computation of the soil foundation based on in-situ testing[J]. Guangdong Water Resources and Hydropower, 2010(7): 4 - 6. (in Chinese))
- [8] 王长科. 用旁压试验原位测定土的强度参数[J]. 勘察科学技术, 1992(6): 25 - 27. (WANG Chang-ke. Strength parameters of soil determined by pressure test in situ[J]. Site Investigation Science and Technology, 1992(6): 25 - 27. (in Chinese))
- [9] 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. Hyperbola model in calculating the nonlinear settlement of foundation[J]. Ground Improvement, 1997(1): 50 - 53. (in Chinese))
- [10] 杨光华. 地基沉降计算的新方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, **27**(4): 679 - 686. (ANG Guang-hua. New computation method for soil foundation settlement[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, **27**(4): 679 - 686. (in Chinese))
- [11] 岩土工程勘察规范: DGJ 08—37—2002[S]. 2002. (Geotechnical Engineering Investigation Code: DGJ 08—37—2002[S]. 2002. (in Chinese))
- [12] 王长科. 用旁压试验推求土体强度指标的方法探讨[J]. 勘察科学技术, 1989(1): 1 - 3. (WANG Chang-ke. Determination of Strength of soil by pressure test in situ [J]. Site Investigation Science and Technology, 1989(1): 1 - 3. (in Chinese))
- [13] 杨光华. 根据经验地基承载力反算土的强度和变形参数[J]. 广东水利水电, 2002(1): 3 - 6. (YANG Guang-hua. According to the experience of foundation bearing capacity to inverse the strength and deformation parameters of soil[J]. Guangdong Water Resources and Hydropower, 2002(1): 3 - 6. (in Chinese))
- [14] 徐超, 石振明, 高彦斌, 等. 岩土工程原位测试[M]. 上海: 同济大学出版社, 2005. (XU Chao, SHI Zheng-ming, GAO Yan-bin, et al. Geotechnical Engineering In-Situ Test[M]. Shanghai: Tongji University Press, 2005. (in Chinese))
- [15] 杨光华, 骆以道, 张玉成, 等. 用简单原位试验确定切线模量法的参数及其在砂土地基非线性沉降分析中的验证[J]. 岩土工程学报, 2013, **35**(3): 401 - 408. (ANG Guang-hua, LUO Yi-dao, ZHANG Yu-cheng, et al. Determination of parameters for tangent modulus method using simple in-situ test and its application in nonlinear settlement analysis on sandy soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, **36**(5): 855 - 863.)
- [16] 刘琼, 杨光华, 刘鹏. 基于原位旁压试验的地基非线性沉降计算方法[J]. 广东水利水电, 2010(7): 4 - 6. (LIU Qiong, YANG Guang-hua, LIU Peng. Nonlinear settlement computation of the soil foundation based on in-situ testing[J]. Guangdong Water Resources and Hydropower, 2010(7): 4 - 6. (in Chinese))
- [17] 嘉益大厦课题研究小组. 厦门嘉益大厦基础设计研究报告[R]. (Jiayi Building Research Group. Research Report on foundation design of Xiamen Jiayi building[R]. (in Chinese))
- [18] 刘琼. 基于原位试验的地基非线性沉降计算方法的研究与应用[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2009. (LIU Qiong. Research and Application of Nonlinear Settlement Calculation Method Based on in Situ Test[D]. Handan: 2009. (in Chinese))