

应用切线模量法计算天然地基沉降的探讨

乔承杰

(河南省建院勘测设计有限公司, 河南 郑州 450014)

摘要: 依据地基土层的 c 、 φ 、 E_0 三个参数模拟载荷试验时, 变形计算深度取 2 倍的载荷板宽度或直径, 初始切线模量按变形模量取值; 模拟实际基础沉降时, 变形计算深度按高层建筑勘察标准取值, 初始切线模量按 2 倍的变形模量取值, 当采用硬塑-坚硬的黏性土作天然地基筏板基础时, 变形模量取 4 倍的压缩模量; 当采用密实的砂层作天然地基筏板基础时, 变形模量取 3 倍的压缩模量, 运用切线模量法进行载荷试验的模拟和实际基础下的沉降计算, 通过两个实例的分析, 得到了不同基底压力下的安全系数和沉降值, 满足了地基强度安全和变形控制的双控原则, 可为地基基础的初步设计提供更好的参考。并指出后续应用时应考虑初始切线模量随基础尺寸、土层深度的变化规律, 载荷试验数据的时间效应修正等问题。

关键词: 切线模量; 变形模量; 载荷试验; 基础沉降; 变形计算深度; 双控原则

中图分类号: TU471

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2022)05-0394-06

Discussion on the application of tangent modulus method in settlement calculation of natural foundation

QIAO Cheng-jie

(Henan Geological Investigation and Designing Institute Co., Ltd., Zhengzhou 450014, Henan, China)

Abstract: When the three parameters of c 、 φ 、 E_0 of the foundation soil layer are used to simulate the load test, the deformation calculation depth is taken as twice the width or diameter of the load plate, and the initial tangent modulus is taken as the deformation modulus. When simulating the actual foundation settlement, the deformation calculation depth is taken according to the survey standard for high-rise buildings, and the initial tangent modulus is taken as twice the deformation modulus. When the hard plastic clay soil is used as the raft foundation of natural foundation, the deformation modulus is taken as 4 times the compression modulus. When the dense sand layer is used as the raft foundation of natural foundation, the deformation modulus is taken as 3 times of the compression modulus. The tangent modulus method is used to simulate the load test and calculate the settlement under the actual foundation. Through the analysis of two examples, the safety factors and settlement values under different foundation pressure are obtained, which satisfies the double control principle of foundation strength safety and deformation control, and can provide a better reference for the preliminary design of foundation. The subsequent application should consider the change of the initial tangent modulus with the size of the foundation and the depth of the soil layer, and the correction of the time effect of the load test data.

Key words: tangent modulus; deformation modulus; load test; foundation settlement; deformation calculation depth; double control principle

0 引言

一般的工程建设项目, 勘察单位运用多种勘探手段综合提出各个地层的物理力学性质指标, 然后验算拟建建筑物下的土层修正后的承载力特征值是否大于基底压力, 这是强度验算。强度满足后,

再利用分层总和法计算实际基底压力下的沉降值, 这是变形验算, 当拟建建筑物满足强度和变形验算两个指标时方可进行结构与施工。但主要问题是现阶段的地基承载力特征值缺乏明确的安全系数和对应的沉降值, 将强度安全和变形控制的双控原则割裂开来。载荷试验确定承载力的方法安全可

靠, 但现有载荷试验的沉降比确定特征值的方法不够科学合理, 也不能保证实际基础沉降满足要求^[1]。

文献[1]指出, 合理的确定方法应该是由载荷试验反算出地基土层的强度和变形参数, 这些参数具有确定性和唯一性, 对应基础的承载力则可以根据具体的基础尺寸计算天然地基的极限承载力, 并应用切线模量法计算不同承载力下基础对应的沉降量, 再按强度安全和变形控制的双控原则确定其最大值作为地基的承载力特征值。由此可以得到承载力对应的安全系数和沉降量, 继而达到安全经济的设计目的。

下面用两个实例应用切线模量法模拟平板试验和实际基础下的沉降进行探讨。

1 切线模量法

切线模量法计算基础沉降曲线的条件为: 假定沉降曲线为双曲线和采用分层总和法的思想。首先假设 $p-s$ 曲线为双曲线方程:

$$p = \frac{s}{a+bs} \tag{1}$$

$$a = \frac{B(1-\mu^2)\omega}{E_{t0}} \tag{2}$$

$$b = \frac{1}{p_u} \tag{3}$$

$$E_t = (1-R_f \cdot \frac{p}{p_u})^2 E_{t0} \tag{4}$$

式中: a 、 b 为常数; B 为载荷板宽度或直径, m; μ 为泊松比, 0.3; ω 为几何形状系数, 圆形 0.785, 方形 0.886; p_u 为地基极限承载力, kPa; p/p_u 为底板底面处所受压力 p 与极限承载力 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(4)表明土的切线模量取决于 p/p_u 的比值; R_f 为破坏比系数, 一般取 0.8~1.0; E_{t0} 为初始切线模量, MPa。

极限承载力 p_u 按照太沙基地基承载力公式计算:

$$p_u = 0.5\gamma BN_\gamma + qN_q + cN_c \tag{5}$$

式中: N_γ 、 N_q 、 N_c 为极限状态时的承载力系数, 是持力层内摩擦角 φ 的函数, 通过土力学教材查得; B 为基础宽度, m; q 为基础两侧超载值, kPa; c 为黏聚力, kPa; γ 为重度, kN/m³。

分层总和法的计算过程如下: 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 的土层产生的沉降为:

$$\Delta s_{ij} = \frac{\Delta p_i a \Delta h_j}{E_{ij}} \tag{6}$$

式中: E_{ij} 为对应 p_i 在 h_j 处原状土的等效切线模量, MPa; 假设增量荷载 Δp 过程中土体的变形是线性的, a 为应力分布系数; $\Delta p_i a$ 为 Δp_i 在 h_j 处所产生的应力增量; Δh_j 为土层分层厚度, m; Δp_i 所产生的沉降为:

$$\Delta s_i = \sum_{j=1}^n \Delta s_{ij} \tag{7}$$

从公式(1)~(7)中可以看出影响计算沉降值准确度的因素主要为地基变形计算深度和初始切线模量的确定。

2 数值模型及参数

这里引用的两个例子比较有代表性, 均为高层建筑采用天然地基筏板, 文献[2]采用硬塑-坚硬的粉质黏土、文献[3]采用密实的砂层作为基础持力层, 由于修正后的持力层承载力特征值不满足上部荷载要求, 因此需要浅层平板载荷试验进行验证。

2.1 实例 1

引用文献[2]的实例, 郑州某项目地上 A 座 25 层, 基底平均压力 490 kPa。勘察报告中给出的基底持力层第 8 层地基承载力特征值 $f_{ak}=250$ kPa, 现场在持力层位置共进行了 4 组载荷试验, 承压板面积 0.5 m², 试验结果见表 1。第 8 层承载力特征值为 320 kPa, 最大加载量为 800 kPa。根据试验结果, 第 8 层变形模量为 50.9 MPa, 约为压缩模量的 4.8 倍, 第 9~10 层按第 8 层平均变形模量与压缩模量的增大比例计算。采用的参数如表 2, 第 8 层以下均为粉质黏土。

表 1 载荷试验数据 (实例 1)

Table 1 Load test data (Example 1)

荷载/ kN	沉降量/mm				
	试验点 1	试验点 2	试验点 3	试验点 4	平均值
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
100	0.82	0.78	0.93	1.02	0.89
200	2.13	2.35	1.96	2.22	2.17
300	3.37	5.57	4.21	5.62	4.69
400	4.38	6.65	5.13	6.81	5.74
500	7.45	8.32	6.55	7.89	7.55
600	10.11	10.75	9.88	11.32	10.52
700	16.42	15.43	16.32	18.33	16.63
800	29.16	20.53	21.83	25.81	24.33

表2 基本参数表(实例1)
Table 2 Basic parameters (Example 1)

粉质黏土	重度	黏聚力	内摩擦角	压缩模量	变形模量
层号	$\gamma/(\text{kN}/\text{m}^3)$	c/kPa	$\varphi/(\text{°})$	E_s/MPa	E_0/MPa
⑧	19.4	35	19	10.6	50.9
⑨	19.2	35	19	11.6	55.7
⑩	19.2	35	19	10.9	52.3
⑪	19.2	35	19	11.3	54.3

由于载荷板尺寸小,变形计算深度对计算结果影响不大,一般取 $2B$ 。模量关系按照初始切线模量等于变形模量考虑,即 $E_{t0}=E_0$ 。由表1的参数结合公式(1)~(7),绘制的曲线如图1所示。

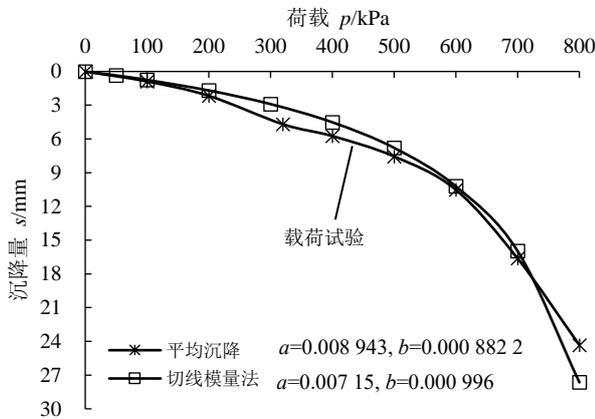


图1 计算 $p-s$ 曲线(实例1)
Fig. 1 Calculate $p-s$ curve (Example 1)

从图1中可以看出,320 kPa对应的沉降量为3.3 mm,最大加载800 kPa对应的沉降量为28.7 mm。与文献[2]给出的沉降量比较一致。地勘报告给出的250 kPa对应的沉降量约为2.7 mm。若按照试验终止加载条件,沉降量与承压板宽度或直径之比大于等于0.06^[4],那么沉降量42.4 mm对应的荷载为840 kPa,那么250 kPa、320 kPa对应的安全系数分别约为 $840/250 \approx 3.36$ 、 $840/320 \approx 2.63$ 。

2.2 实例2

引用文献[3]的实例,西安某项目地上33层,基底平均压力550 kPa。基底持力层为第3层细中砂 $f_{ak}=230$ kPa,现场在基底进行了3组载荷试验,载荷板采用直径1 m的圆板,试验结果见表3。第3层承载力特征值为350 kPa,最大加载量为700 kPa。根据试验结果,第3层变形模量平均值约为80.0 MPa,约为压缩模量的3.2倍,其下地层按同比例增大计算。采用的参数如表4。

从图2中可以看出,350 kPa对应的沉降量为2.47 mm,最大加载700 kPa对应的沉降量为7.77 mm。

两者曲线比较一致,230 kPa对应的沉降量约为1.45 mm。按照同样的终止加载条件,沉降量60 mm对应的荷载为1170 kPa,那么230 kPa、350 kPa对应的安全系数分别约为 $1170/230 \approx 5.1$ 、 $1170/350 \approx 3.3$ 。

表3 载荷试验数据(实例2)
Table 3 Load test (Example 2)

荷载/kN	沉降量/mm			
	试验点1	试验点2	试验点3	平均值
0	0.00	0.00	0.00	0.00
100	0.80	0.81	0.81	0.81
200	1.34	1.49	1.52	1.43
300	2.41	2.01	1.98	2.13
400	3.31	3.29	3.32	3.30
500	4.41	4.38	4.44	4.40
600	6.11	5.75	5.75	5.87
700	7.39	7.39	7.44	7.40

表4 基本参数表(实例2)
Table 4 Basic parameters (Example 2)

土层号	重度	黏聚力	内摩擦角	压缩模量	变形模量
	$\gamma/(\text{kN}/\text{m}^3)$	c/kPa	角 $\varphi/(\text{°})$	E_s/MPa	E_0/MPa
③细中砂	19	0	32	25	80.0
④中粗砂	19	0	35	30	96.0
⑤粉质黏土	19	25	26	13	40.0
⑥中砂	19	0	35	32	102.4

绘制的曲线如图2所示。

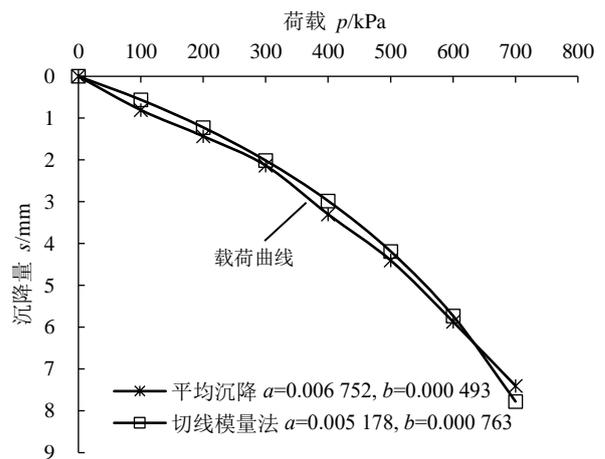


图2 计算 $p-s$ 曲线(实例2)
Fig. 2 Calculate $p-s$ curve (Example 2)

从上述两个实例看出,利用 c 、 φ 、 E_0 运用切线模量法绘制的 $p-s$ 曲线同现场载荷试验较为一致,由于现场试验只是做到了设计要求的最大加载量,地基并未做到破坏。而运用切线模量法计算出的曲

线可以推定极限承载力, 地基基础设计时不管采用什么样的承载力数值都能从曲线中得到明确的安全系数和对应的沉降值。

3 实际基础下的应用与探讨

高层建筑采用天然地基的最大问题是建筑物的沉降能否满足设计要求, 要预估建筑物建成后可能产生的沉降就要用到实际基础下的 $p-s$ 曲线, 它不同于平板载荷试验。采用前面两个实例的数据结合切线模量法绘制出实际基础下的 $p-s$ 曲线, 同实测曲线相比, 同样可以得到对应的安全系数。

3.1 实例 1

文献[2]中的项目基础埋深 16.73 m, 基础尺寸 35.7 m×26.7 m, 按照地基沉降计算新方法计算地基沉降, 可以不用考虑地基压缩层深度, 而按照地基实际土层情况计算^[5], 实际上不同的变形计算深度对结果有较大的影响。这里分别按以下标准进行深度取值:

- (1) 按 1 倍和 2 倍的基础宽度。
- (2) 取应力分布系数 $\alpha=0.1$ 对应的地基变形计算深度, 约 62 m。
- (3) 根据高层建筑勘察标准^[6]中的公式:

$$z_n = (z_m + \zeta b)\beta \quad (8)$$

式中: z_n 为变形计算深度, m; z_m 为经验值, 11.8 m; β 为调整系数 0.75; ζ 为折减系数, 0.45。

计算得到的 $z_n=18.0$ m。

初始切线模量 $E_{t0}=2E_0$ ^[7], 形成的曲线如图 3 所示。

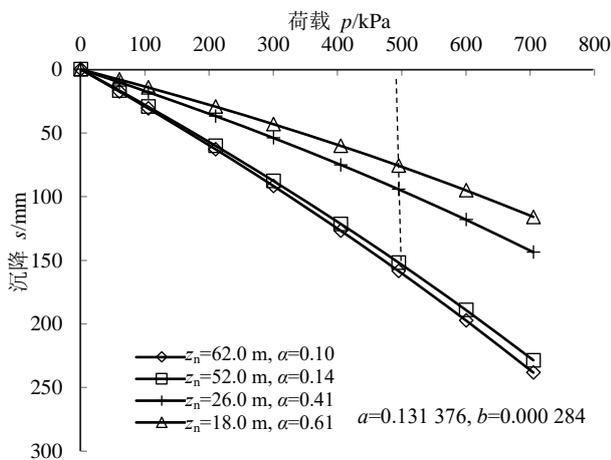


图 3 $p-s$ 曲线 (实例 1)

Fig. 3 $p-s$ curve (Example 1)

由于实测数据仅是封顶时的数据, 考虑到后期荷载的继续增加及黏性土的固结沉降时间较长, 最

终沉降值取 38.2 mm。文献[2]中给出的各个方法计算得到的沉降量和实测沉降量见表 5。

表 5 沉降量表 (实例 1)

Table 5 Calculated settlement (Example 1) mm				
方法	按压缩模量	按变形模量	封顶时实测	最终推测
沉降量	114.0	76.2	10.9	38.2

从图 3 可以看出, 基底平均压力 490 kPa 下对应不同的变形计算深度 18 m、26 m、52 m、62 m 的沉降量分别约为 75.7 mm、94.3 mm、151.8 mm、158.5 mm, 即使按 75.7 mm 考虑, 约是 38.2 mm 的 2 倍, 仍然比实测值大得多。若按 2 倍反算变形模量, 则第 8 层的变形模量为 101.8 MPa。此时若按照变形计算深度 18 m、沉降量 100 mm 对应的荷载值为实际基础极限承载力, 极限值为 625 kPa, 490 kPa 的基底压力对应的安全系数约为 1.3 倍。

3.2 实例 2

文献[3]的基础埋深 10.3 m, 基础尺寸 16.00 m×57.75 m。同样的, 按不同的变形计算深度分别计算, 其中 $z_n=11.0$ m, 形成的曲线如图 4 所示。

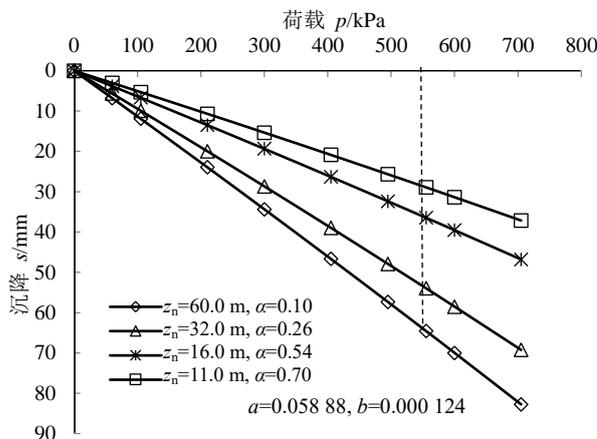


图 4 $p-s$ 曲线 (实例 2)

Fig. 4 $p-s$ curve (Example 2)

文献[3]中的各个方法计算得到的沉降量和实测沉降量见表 6。

表 6 沉降量表 (实例 2)

Table 6 Calculated settlement (Example 2) mm				
方法	按压缩模量	按变形模量	封顶时实测	封顶 2 年
沉降量	46.0~53.1	—	11.03~16.85	27.07~33.69
平均值	50.0	—	14.40	33.03

从图 4 可以看出, 基底平均压力 550 kPa 下对应不同的变形计算深度 11 m、16 m、32 m、60 m 的沉降量分别约为 28.9 mm、36.5 mm、53.9 mm、64.6 mm, 平均沉降量 33.03 mm 位于 28.9~36.5 mm 之间。此

时若按照变形计算深度 11 m、沉降量 100 mm 对应的荷载值为实际基础极限承载力, 极限值为 1 400 kPa, 550 kPa 的基底压力对应的安全系数约为 2.5 倍。

4 模量关系反算

上述两例中在模拟载荷试验时按照 $E_{10}=E_0$ 计算, 由实例 1, $B=0.707\text{ m}$, $\mu=0.3$, $\omega=0.886$, $\alpha=0.007\ 15\text{ m/MPa}$, 代入公式 (2) 可得:

$$E_{10}=\frac{0.707\times(1-0.3^2)\times 0.886}{0.008\ 943}=63.74\text{ MPa}\quad (9)$$

变形模量 $E_0=50.9\text{ MPa}$, E_{10} 约是 E_0 的 1.25 倍。由实例 2, $B=1.0\text{ m}$, $\mu=0.3$, $\omega=0.785$, $\alpha=0.006\ 752\text{ m/MPa}$, 代入公式 (2) 可得:

$$E_{10}=\frac{1.0\times(1-0.3^2)\times 0.785}{0.006\ 752}=105.80\text{ MPa}\quad (10)$$

变形模量 $E_0=80.0\text{ MPa}$, E_{10} 约是 E_0 的 1.32 倍。模拟实际基础沉降时按照 $E_{10}=2E_0$ 计算, 由实例 1, $B=26\text{ m}$, $\alpha=0.131\ 376\text{ m/MPa}$, 代入公式 (2) 可得: $E_{10}=138.5\text{ MPa}$, E_{10} 约是 E_0 的 2.72 倍。由实例 2, $B=16\text{ m}$, $\alpha=0.058\ 88\text{ m/MPa}$, 代入公式 (2) 可得: $E_{10}=190.2\text{ MPa}$, 约是 E_0 的 2.38 倍。

由土的 Duncan-Chang 模型可知^[8], 土的初始模量 E_{10} 是随围压的增大而增大的, 则深层土的初始切线模量应该是随深度而增大的。从上述计算中可以看出, 在模拟载荷试验时, E_{10} 约是 E_0 的 1.25 倍和 1.32 倍, 在模拟实际基础沉降时, E_{10} 约是 E_0 的 2.72 倍和 2.38 倍, 可见随着基础尺寸的增大, 荷载影响深度的加深, E_{10} 是随着土层深度的增加而增大的。

5 结 论

通过两个实例验证切线模量法模拟基础沉降是可行的。结论如下:

(1) 模拟载荷试验时, 变形计算深度取 $2B$, $E_{10}=E_0$; 模拟实际基础沉降时, 变形计算深度按高层建筑勘察标准取值, $E_{10}=2E_0$, 通过切线模量法取得的 $p-s$ 曲线, 可以明确知道不同的承载力对应的安全系数和沉降量, 取得了不同压力下的安全系数和沉降值的统一。

(2) 实例 1 的试验结果是第 8 层黏性土变形模量约为压缩模量的 4.8 倍, 实例 2 的试验结果是第 3 层砂层变形模量约为压缩模量的 3.2 倍。因此

在采用硬塑-坚硬的黏性土作天然地基筏板基础时, 土层变形模量可取 4 倍的压缩模量; 在采用密实砂层作天然地基筏板基础时, 土层变形模量可取 3 倍的压缩模量用于初步计算实际基础下的沉降量。

(3) 后续还需要考虑初始切线模量和地基沉降是如何沿深度变化的^[9-10], 还有载荷试验数据的时间效应修正问题^[11]。这些都有待于进一步地积累资料和验证。

参考文献

- [1] 龚晓南, 杨仲轩. 岩土工程变形控制设计理论与实践[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.
GONG Xiao-nan, YANG Zhong-xuan. Theory and Practice of Deformation Control Design in Geotechnical Engineering[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2018.
- [2] 刘明林. 某高层建筑基础优化选型研究[J]. 河南城建学院学报, 2014, 23(2): 39-43.
LIU Ming-lin. Study on optimal foundation selection of a tall building[J]. Journal of Henan University of Urban Construction, 2014, 23(2): 39-43.
- [3] 苗长春, 张平顺, 任讯波. 西安地区以细中砂为持力层采用天然地基的某 33 层高层建筑设计[J]. 建筑结构, 2017, 47(2): 96-99.
MIAO Chang-chun, ZHANG Ping-shun, REN Xun-bo. Design of a 33-layer high-rise building adopting natural foundation in medium-fine sand bearing layer in Xi'an[J]. Building Structure, 2017, 47(2): 96-99.
- [4] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑地基基础设计规范: GB50007—2011[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for Design of Building Foundation: GB50007—2011[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011.
- [5] 乔有梁, 杨光华, 张玉成. 基于地基沉降计算新方法对地基压缩层深度的研究[J]. 广东水利水电, 2013(7): 14-18.
QIAO You-liang, YANG Guang-hua, ZHANG Yu-cheng. Study on the depth of foundation compression layer based on the new method of foundation settlement calculation[J]. Guangdong Water Resources and Hydropower, 2013(7): 14-18.
- [6] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 高层建筑岩土工

