



圆(环)形基础沉降计算

舒燕平

华东电业管理局 科学技术委员会
华东电力集团公司

园(环)形基础沉降计算

舒燕平

江苏工业学院图书馆
藏书章

华东电业管理局
中国华东电力集团公司

科学技术委员会

序

作者八十年代曾在电力工业部中南电力设计院从事土建结构设计工作,接触建筑物基础沉降计算,发现有关规范及文献所提供的沉降计算数表不尽完善,尤其是土木工程和电力建设中常见的园形建筑物(如电视天线塔、水塔、烟囱、油罐、冷却塔等)基础,仅提供了园形面积均布荷载中点和三角形分布荷载最大最小二边点下面的系数,因而无法进行环形基础沉降计算及考虑园形基础对相邻建筑物的沉降影响。为此作者曾由土中附加应力的基本公式着手,根据我国地基规范有关沉降计算的规定,对不同形状基础进行数值积分,编制了性能较为完整的基础最终沉降量计算程序,并用此程序补充算出园形(环形)基础沉降计算所需的全部数表,填补了该项空白。

该项工作曾陆续在《电力技术》、《土工基础》、《电力设计土建动态》等杂志和内部刊物上作过介绍(因受杂志篇幅限制,附表均无刊登),中南电力设计院亦内部出版供工程设计应用。

九十年代以来,新型、高层建筑物不断出现,地基沉降及相互影响的准确计算,更显重要。在目前尚无这方面完善资料的情况下,该项成果作为建筑物设计,尤其电力建设工程的设计工具书尚有一定的价值。在华东电管局原副总工程师曹敏

4093/07

永、中南电力设计院副总工程师陈士逵、上海民用建筑设计院教授级高工周其恭等同志的支持和鼓励下,现根据《建筑地基基础设计规范》(GBJ7--89)的新规定作了修改后出版,希望对建筑设计、电力建设有些参考价值。

目 录

- 第一章 结构物基础沉降计算引言
- 第二章 圆形面积上三角形分布荷载作用下的附加应力系数
- 第三章 圆形面积上三角形分布荷载作用下的平均附加应力系数
- 第四章 圆(环)形基础最终沉降量计算算例
- 附录一 误差对比
- 附录二 矩形面积附加应力系数 α 、平均附加应力系数 $\bar{\alpha}$ 。
- 附录三 分层总和法地基最终沉降量计算程序简介

第一章 结构物基础沉降计算引言

评价一个地基基础或土工结构物设计是否安全可靠,常常需要估算建筑物下面地基土由于静荷载的作用所引起的竖向位移,即沉降量。建筑物的沉降主要是由于水从土的孔隙中逐渐排出和土粒骨架同时相应发生的压缩。荷载作用下地基土中附加应力的计算则是建筑物基础沉降计算的基础。

一般情况下,土的变形与荷载的关系并不是线性的,但是各种大小比尺的室内试验和现场试验表明,当模型的边界条件相似于原型的边界条件,且作用荷载不太大时,将土体当作线性弹性介质考虑,得到的应力分布计算值和测量值是相当吻合的。实践表明,对于许多种地基土来说,按线弹性假设仍可以得到沉降量的合理预估值。故我国现行《建筑物地基基础设计规范》(GBJ7—89)第 5.2.5 条规定“计算地基变形时,地基内的应力分布,可采用各向同性均质的直线变形体理论。”

当然,不同的土质对线弹性假设的适应程度是不同的,对于饱和的或几乎饱和的粘性土,在中等应力变化范围内,土的弹模可以假定为恒量,对于无粘性土则当作恒量时误差要大得多。因此实际计算时常采用半经验方法,除对不同土层分层计算,并对分层总和计算公式引入经验系数,对不同压缩模量的土质和不同基底附加压力进行修正。

J、布辛奈斯克(Boussinesq)在 1885 年首先根据弹性理论解出了线弹性半无限空间内,由于垂直作用在其表面上的

一个点荷载所引起的应力分布：

$$\left. \begin{aligned} \sigma_z &= \frac{3Pz^3}{2\pi R^5} = \frac{3P}{2\pi z^2} \frac{1}{[1 + (\frac{r}{z})^2]^{5/2}} \\ \sigma_r &= \frac{P}{2\pi} \left[\frac{3zr^2}{R^5} - \frac{1 - 2\mu}{R(R+z)} \right] \\ \sigma_\theta &= \frac{P}{2\pi} (1 - 2\mu) \left[\frac{1}{R(R+z)} - \frac{z}{R^3} \right] \\ \tau_{rz} &= \frac{3P}{2\pi} \frac{z^2 r}{R^5} \\ \tau_{\theta z} &= \tau_{r\theta} = 0 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中 μ 为泊松比,其他符号可由图 1 说明。由式 1 可见,与沉降量计算关系最大的竖向应力 σ_z 与材料的弹性常数无关,这也说明了,将土体作为线性弹性介质计算应力分布是可行的。应指出,布辛奈斯克推出的公式是假定应力是在无重量的线弹性介质内发生的,实际应用时,还应将材料自重引起的应力叠加进去。

实际荷载一般不会是点荷载,除非所求应力点远离面积荷载时,根据圣维南(St. Venant)原理才能将此面积荷载近似假定为点荷载,故应通过积分求得不同荷载分布,不同基础形状情况下地基中某一点的应力。工程实践中基础主要承受均布荷载和偏心荷载二种,基础的形状以矩形最为常见,其次则是园(环)形(如电视天线塔、水塔、烟囱、油罐、电力冷却塔等)。在国家地基设计规范和其他计算手册中,一般都提供有矩形基础角点下、园形基础均布荷载中点下和偏心荷载(三角形分布荷载)最大最小边点下不同深度点的附加应力系数和平均附加应力系数,以便设计人员查用。

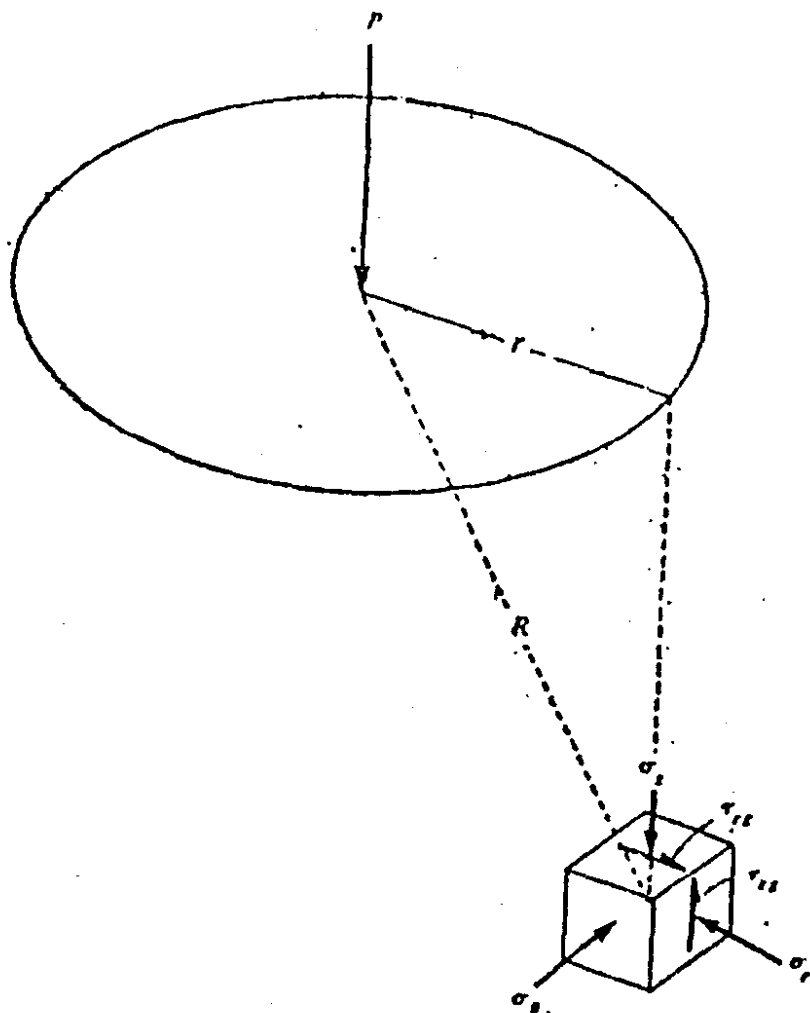


图1 弹性半空间内由于作用在其表面上的点荷载所引起的应力

对于矩形基础,有了角点下的应力系数,运用迭加原理,可用角点法即:通过所求应力点把荷载面积简单地分为若干矩形块(包括空荷载块),使所求应力点成为它们共有的角点,由附表中查得各矩形块角点下的应力系数,并根据分割情况进行加减,从而求得总的附加应力系数或平均附加应力系数。

显然,对于圆形或环形基础而言,角点法是无法用的。国家基础设计规范(GBJ7—89)第5.2.8条,明确规定“计算地基沉降时,应考虑相邻荷载的影响”。而规范及其他已知文献仅提供了圆形基础下少数几点的应力系数,因此圆形基础对

相邻建筑物的沉降影响以及环形基础自身的沉降计算,均无法直接查表进行。

纽马克(New mark)在 1942 年作出的具有相同感应面积的感应图虽然可作近似计算,但使用方法比较繁琐,且只能近似解决均布荷载面积下的问题,偏心荷载问题仍无法解决。

本书从 J. 布辛奈斯克垂直点荷载作用下地基中应力的基本公式出发,通过数学处理,对圆形面积上作用三角形分布荷载情况,运用计算机对地基中的任意点进行数值积分,将结果列成表格(均布荷载则可看成二个三角形分布荷载叠加),配合原有的矩形基础附加应力角点表格,即可查表计算圆形基础、环形基础自身沉降,以及对其他各种相邻地基的沉降影响。具有精度高、计算简便的优点。

附录三则更进一步按规范要求将矩形、圆形基础沉降计算编成程序,可同时考虑若干基础(包括非正交的矩形基础、环形、圆形基础等)在不同的均布和偏心荷载作用下的相互影响和自身沉降计算。

第二章 圆形面积上三角形分布荷载作用下的附加应力系数

由第一章知, J. 布辛奈斯克已于 1885 年求得了半无限体表面作用垂直集中力 P 时, 在半无限体内任意点 M 所引起的竖向应力

$$\sigma_z = \frac{3P}{2\pi} \cdot \frac{z_M^3}{R^5} \quad (1)$$

式中 σ_z —— 垂直向应力

P —— 作用于半无限体表面的垂直集中力

R —— 半无限体内任一点 M 的向径

若取坐标系如图 2 所示, 则

$$R = \sqrt{(x - x_M)^2 + (y - y_M)^2 + z_M^2}$$

x_M, y_M, z_M —— M 点的坐标

设坐标系中作用有圆形面积三角形分布荷载, 坐标原点放在园周压力为零点处, 并以 X 轴为对称轴(如图 2 所示), 则该三角形分布荷载在 M 点的垂向应力可由公式(1)积分求得:

在荷载分布面上取一微面积 $d_x d_y$, 将微面积上的荷载化为集中力并以 dp 表之:(见图 3)

$$dp = \frac{px d_x d_y}{b}$$

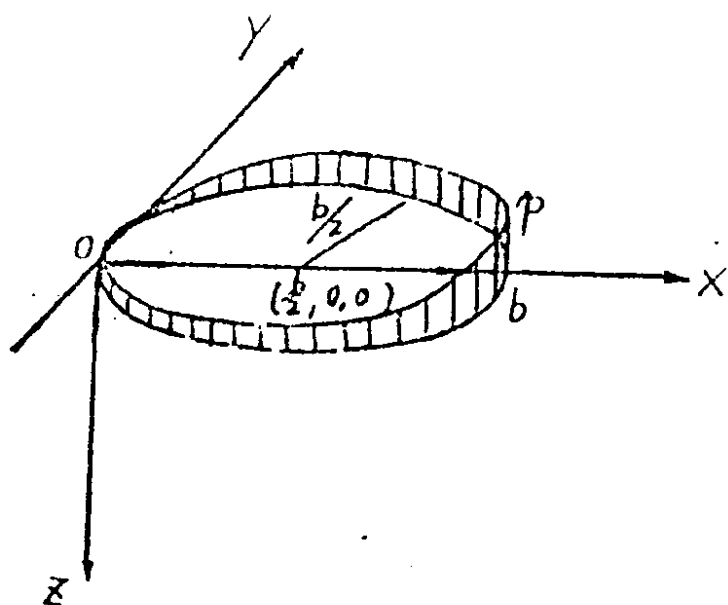


图 2

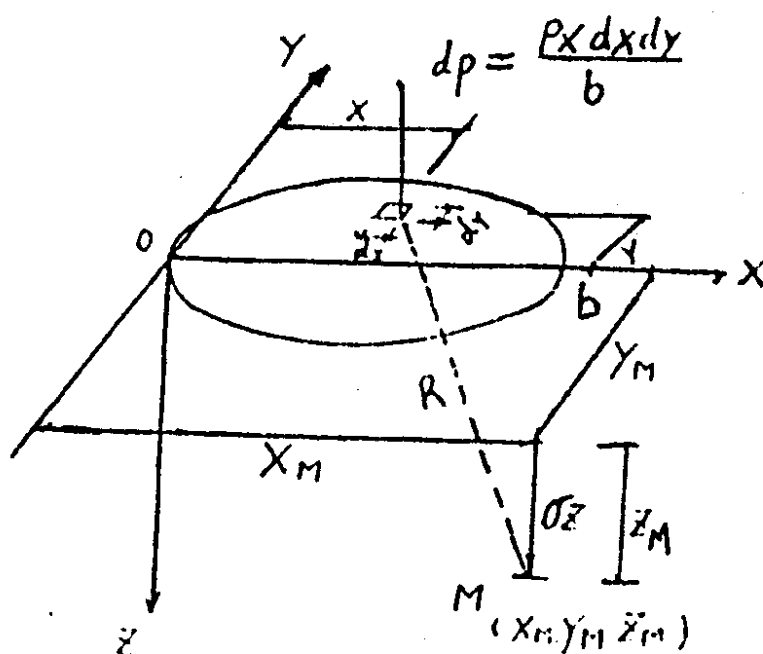


图 3

式中 b ——圆直径

p ——三角形荷载顶点的荷载强度 T/M^2

$\frac{px}{b}$ ——坐标 x 处的荷载强度

地基中任意点 $M(x_M, y_M, z_M)$ 到微面积 d, d_y 的距离为

$$R = \sqrt{(x - x_M)^2 + (y - y_M)^2 + z_M^2}$$

将 dp, R, z_M 代入 (1) 式, 并在全部荷载面积内积分得二重积分式:

$$\sigma_z = \frac{3pz_M^3}{2\pi} \int_0^b \int_{-\sqrt{bx-x^2}}^{\sqrt{bx-x^2}} \frac{xd_x dy}{[(x - x_M)^2 + (y - y_M)^2 + z_M^2]^{5/2}} \quad (2)$$

采用辛普森方法求解二重积分, 二重积分式 (2) 可化为两次单积分

$$\sigma_z = \frac{3pz_M^3}{2\pi} \int_0^b S(x) dx$$

$$S(x) = \int_{-\sqrt{bx-x^2}}^{\sqrt{bx-x^2}} \frac{xd_y}{[(x - x_M)^2 + (y - y_M)^2 + z_M^2]^{5/2}} \quad (3)$$

对于每个单积分的计算均采用辛普森法, 即第一次把积分区间分成 2 等分, 第二次分成 2^2 等份……, 每次把分点加密一倍, 计算积分近似值, 自动选步长使其相邻两次值的绝对或相对误差小于预先给定的允许误差。近似公式如下:

$$\sigma_{znxny} = \frac{pz^3 hx}{4\pi} \left[S(0) + S(b) + 2 \sum_{\substack{i=1 \\ (n_x \geq 2)}}^{n_x-1} S(ihx) + 4 \sum_{i=1}^{n_x} S(-\frac{hx}{2} + ihx) \right] \quad (4)$$

其中 $hx = \frac{b}{nx}$

$$\begin{aligned}
 \text{而 } S(x) = & \frac{hy(x)}{6} \left[\frac{x}{[(x-y_M)^2 + (-\sqrt{bx-x^2}-y_M)^2 + z_M^2]^{5/2}} \right. \\
 & + \frac{x}{[(x-x_M)^2 + (\sqrt{bx-x^2}-y_M)^2 + z_M^2]^{5/2}} + 2 \sum_{\substack{j=1 \\ (ny \geq 2)}}^{n_y-1} \\
 & \frac{x}{[(x-x_M)^2 + (-\sqrt{bx-x^2} + jhy(x)-y_M)^2 + z_M^2]^{5/2}} + 4 \sum_{j=1}^{n_y} \\
 & \left. \frac{x}{[(x-x_M)^2 + (-\sqrt{bx-x^2} - \frac{hy(x)}{2} + jhy(x)-y_M)^2 + z_M^2]^{5/2}} \right]
 \end{aligned} \tag{5}$$

$$\text{其中 } hy(x) = \frac{2 \sqrt{bx-x^2}}{ny}$$

$2nx, 2ny$ 分别是沿 x, y 轴等分积分区间时的等分数。

在计算过程中,对于相邻两次计算所得的近似值 $\sigma_{z,n}$ 和 $\sigma_{z,n+1}$ 考察

$$d = \begin{cases} \sigma_{z,n} - \sigma_{z,n+1} & \text{当 } |\sigma_{z,n+1}| < KC \\ \frac{\sigma_{z,n} - \sigma_{z,n+1}}{\sigma_{z,n+1}} & \text{当 } |\sigma_{z,n+1}| \geq KC \end{cases} \tag{6}$$

式中 $KC=1.0$ ——误差控制常数

若 $|d| < \text{eps}$

eps 为允许误差限,取为 0.001,则以 $\sigma_{z,n+1}$ 作为积分近似值,否则将分点加密一倍继续计算。以上工作均由计算机进行。

若令 $p=1.0$

则求得的 $\sigma_{z,n+1}$ 即为垂直附加应力系数 α

$$\sigma_z = \alpha p$$

由于荷载以 x 轴为对称轴, 对称分布。故仅需算出一半面积下不同高程的垂直附加应力系数 α 。已算出的平面范围见图 4, 深度范围为 $10R$ (为与习惯一致, 座标仍以园心为零点)。

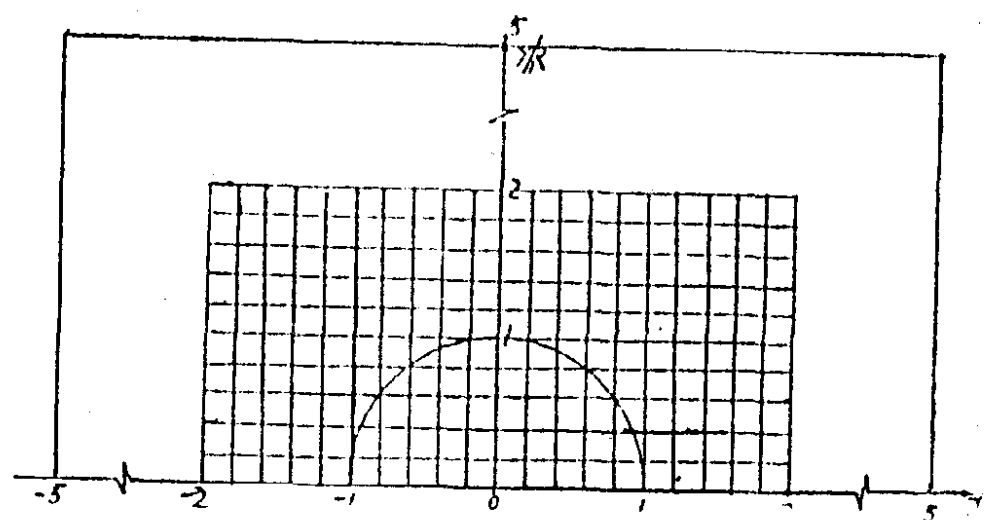


图 4 R —园半径

计算所得园形面积上作用三角形分布荷载地基内各点的附加应力系数 α 见表一。

图 5 绘出了土体内 $y=0, 0.6, 1.0$ 剖面上该附加应力的分布曲线。由图可以看出, 应力图偏向三角形分布荷载顶点方向, 但在较深部位偏移则不明显, 这是符合圣维南原理的; 位于荷载面积下较浅深度部位竖向应力比较集中, 在较深处竖向应力由于扩散而减小; 在荷载面积以外部位, 地表竖向应力为零, 在某个深度达最大值, 此后随深度而逐渐减小。

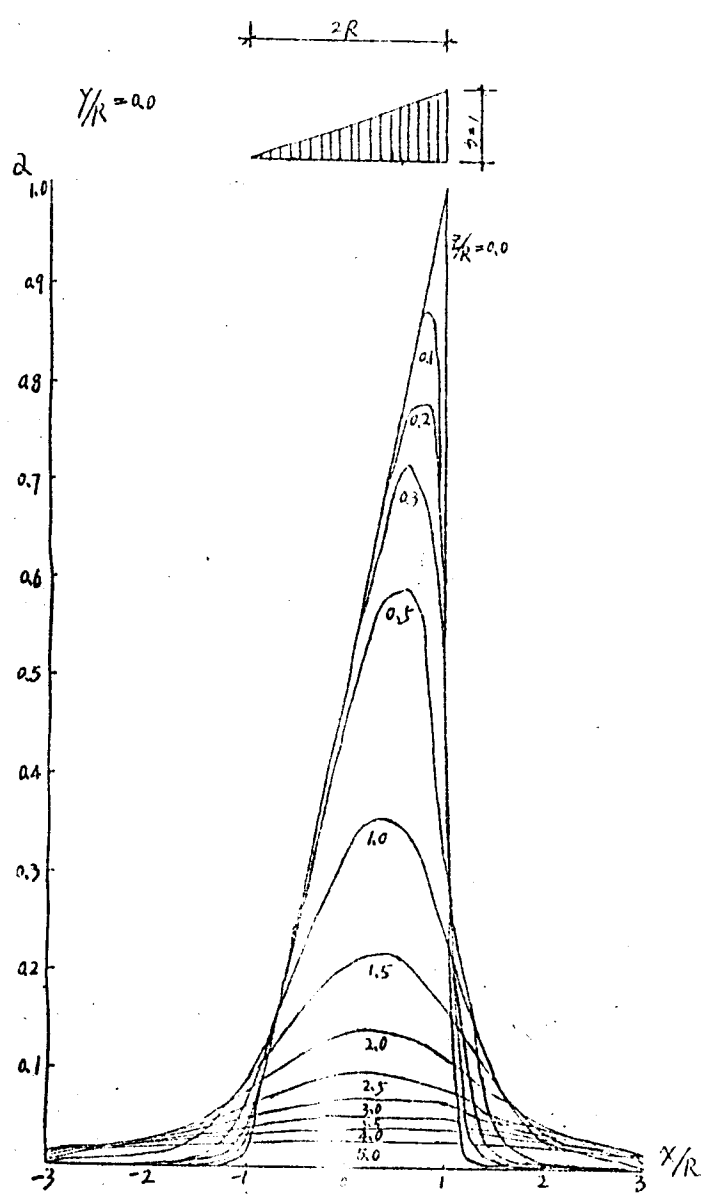


图 5a 圆形面积上三角形分布荷载作用引起的竖向应力分布

