

# 地基土的均匀性判别

中国兵器工业勘察研究院 化建新

**【提要】**本文利用不同基础受不同荷载时地基土附加应力系数计算公式，导出了它们相应的平均应力系数计算公式。利用土的压缩模量当量值，结合一个实例，评价了地基土的均匀性。

**【Abstract】** On the basis of additional stress coefficient calculation formulas with different load on different foundation, the average stress coefficient calculation formulas were given. The homogeneity of ground soils was estimated using the equivalent value of compressibility modulus.

## 一、概述

地基土的均匀性是地基评价的一个重要内容，地基土的均匀与否，决定着地基是否会产生超出规范的不均匀沉降，是否需要地进行地基处理。如果地基土判定为不均匀性土层时，就必须采用地基处理或对建筑物上部结构和基础采用某些措施，否则地基将会产生过大的差异沉降，造成建筑物开裂，影响建筑物的正常使用。如果能在勘察期间定量地评价地基土的均匀性，则可以在基础施工前，采取一定的措施（如地基处理），消除不良隐患，保证建筑物的安全使用。

作者认为：地基土的不均匀性包括两个方面，其一为承载力标准值差异较大，这方面我们可以通过常规的勘探方法（如标准贯入试验、轻型动力触探试验、静力触探试验、土分析等）加以综合判定。其二为不同地段地基土的变形差异较大，也就是说，地基土的压缩模量在不同的取土孔之间有很大差异，造成基础的不均匀沉降不能满足规范的要求。这方面，可利用压缩层范围内土层的压缩模量当量值进行评价，由于承载力标准值的差异性很容易确定，本文不再评述，仅就地基土的不均匀性的第二方面进行一些探讨。

## 二、地基土的均匀性判别

### （一）地基土的不均匀系数

以往，地基土的不均匀性仅凭岩土工程

师的经验做出判别，由于没有定量指标，每位岩土工程师对同一工程地基土所做的评价结果不尽相同，造成人为误差较大。本文利用地基土的不均匀系数定量地评价地基土的均匀性。北京市勘察院经过对27幢建筑物的统计分析，提出了表1所示的地基土不均匀系数<sup>[1]</sup>。

表1 地基土不均匀系数

场地土压缩模量当量 $\bar{E}_s$ 的平均值	$\leq 4$	7.5	15	$>15$
地基土不均匀系数 $\beta$	1.3	1.5	1.8	2.5

表1中土的压缩模量当量值可按下式计算：

$$\bar{E}_s = \frac{\sum A_i}{\sum (A_i/E_{si})} \quad (1)$$

$$\beta = \frac{\bar{E}_{s, \max}}{\bar{E}_{s, \min}} \quad (2)$$

式中  $\bar{E}_{s, \max}$ ——该场地某一钻孔所代表的地基土在压缩层深度内最大的压缩模量当量值；

$\bar{E}_{s, \min}$ ——该场地另一钻孔所代表的地基土在压缩层深度内最小的压缩模量当量值；

$A_i$ ——第*i*层土附加应力系数沿土层厚度的积分；

$E_{si}$ ——第*i*层土按实际应力段取值

的压缩模量;

$z_i, z_{i-1}$ ——分别为基础以下第  $i$  层、第  $i-1$  层的埋深(如图 1)。

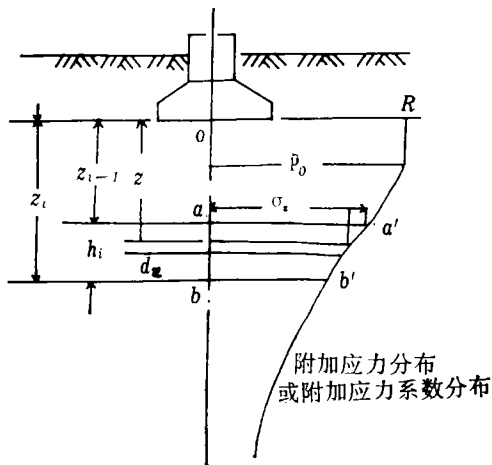


图 1 地基附加应力分布图

图 1 中, 第  $i$  层土附加应力系数沿土层厚度的积分为:

$$A_i = \square aa' b' b = \square o R b' b - \square o R a' a \\ = \int_0^{z_i} \alpha_i dz - \int_0^{z_{i-1}} \alpha_i dz \quad (3)$$

(二) 平均附加应力系数

在图 1 中, 平均附加应力为: <sup>[2]</sup>

$$\bar{\alpha} = \frac{1}{2\pi} \left\{ \frac{B}{z} \ln \left[ \frac{(\sqrt{B^2 + L^2 + z^2} - L)(\sqrt{B^2 + L^2 + L})}{(\sqrt{B^2 + L^2 + z^2} + L)(\sqrt{B^2 + L^2} - L)} \right] \right. \\ \left. + \frac{L}{z} \ln \left[ \frac{(\sqrt{L^2 + B^2 + z^2} - B)(\sqrt{L^2 + B^2 + B})}{(\sqrt{L^2 + B^2 + z^2} + B)(\sqrt{L^2 + B^2} - B)} \right] \right. \\ \left. + \arctan \frac{LB}{z\sqrt{L^2 + B^2 + z^2}} \right\} \quad (8)$$

式中  $L$ ——小矩形的长边;

$B$ ——小矩形的短边;

$z$ ——角点下的任意深度(如图 2)。

2. 矩形基础受三角形荷载作用时角点处的平均附加应力系数

$$k = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{L}{B} \left\{ \sqrt{z^2 + L^2} - L + \sqrt{B^2 + L^2} - \sqrt{B^2 + L^2 + z^2} \right. \\ \left. + \frac{B^2}{L} \ln \left[ \frac{\sqrt{B^2 + z^2} (L + \sqrt{B^2 + L^2})}{B(L + \sqrt{B^2 + L^2 + z^2})} \right] \right\} \quad (9)$$

$$\sigma = p_0 \cdot \bar{\alpha}_i \quad (4)$$

$$\bar{\alpha}_i = \frac{\bar{\sigma}_i}{p_0} = \frac{s/z_i}{p_0}$$

$$= \frac{\int_0^{z_i} \sigma_z dz}{z_i p_0} = \frac{\int_0^{z_i} \alpha_i dz}{z_i} \quad (5)$$

$$\text{由式(5)可得: } \int_0^{z_i} \alpha_i dz = \bar{\alpha}_i \cdot z_i \quad (6)$$

式中  $\bar{\alpha}_i$ ——第  $i$  层土的平均附加应力系数;

$p_0$ ——基底附加应力;

$s$ ——四边形  $o R b' b$  的面积;

$$s = \int_0^{z_i} \sigma_z dz = \bar{\sigma}_i \cdot z_i \quad (7)$$

$\sigma_z$ ——地基土中的附加应力;

$\alpha_i$ ——第  $i$  层土的附加应力系数;

$z_i$ ——基础以下第  $i$  层土的埋深。

按式(5), 对不同基础受不同类型荷载作用时, 地基土的附加应力系数  $\alpha_i$  沿深度积分可得到平均附加应力系数如下:

1. 矩形基础受均布荷载时角点处的平均附加应力系数

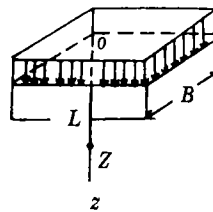


图 2 矩形基础受均布荷载

$$\bar{\alpha} = k/z \quad (10)$$

$z$ ——角点下的任意深度。

式中  $L$ ——小矩形的长边；

$B$ ——小矩形的短边；

3. 条形基础受均布荷载作用时的 平均

附加应力系数

$$\begin{aligned} k = \frac{1}{\pi} & \left\{ z \left( \arctan \frac{B_1 - x}{z} + \arctan \frac{B_1 + x}{z} \right) + \frac{B_1 - x}{2} \ln \left[ \frac{z^2}{(B_1 - x)^2} + 1 \right] \right. \\ & + \frac{B_1 + x}{2} \ln \left[ \frac{z^2}{(B_1 + x)^2} + 1 \right] \\ & - 0.5x \cdot \ln \left[ \frac{(x^2 + z^2 + B_1^2 - 2B_1x)(x^2 + B_1^2 + 2B_1x)}{(x^2 + z^2 + B_1^2 + 2B_1x)(x^2 + B_1^2 - 2B_1x)} \right] \\ & \left. + 0.5B_1 \ln \left[ \frac{(x^2 + B_1^2 + z^2)^2 - 4B_1^2x^2}{(x^2 + B_1^2)^2 - 4B_1^2x^2} \right] \right\} \end{aligned} \quad (11)$$

$$\bar{\alpha} = k/z \quad (12)$$

式中  $2B_1$ ——条形基础的宽度；

$x, z$ 见图4。

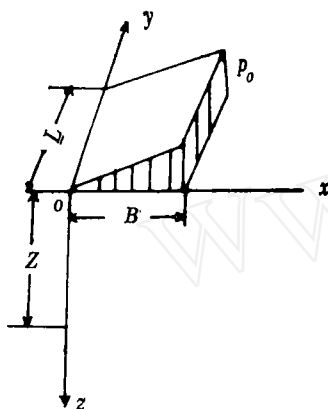


图3 矩形基础受三角形荷载

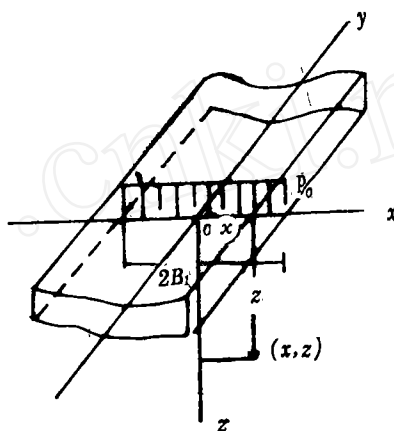


图4 条形基础受均布荷载

4. 条形基础受三角形荷载作用时的平均附加应力系数

$$\begin{aligned} k = \frac{1}{\pi} & \left\{ \frac{x}{B} \left[ z \left( \arctan \frac{x}{z} - \arctan \frac{x-B}{z} \right) \right] \right. \\ & + 0.5x \ln \left( \frac{z^2}{x^2} + 1 \right) - \frac{x-B}{2} \ln \left[ \frac{z^2}{(x-B)^2} + 1 \right] \\ & \left. - 0.5(x-B) \cdot \ln \left[ 1 + \frac{z^2}{(x-B)^2} \right] \right\} \end{aligned} \quad (13)$$

$$\bar{\alpha} = k/z \quad (14)$$

式中  $B$ ——条形基础的宽度；

$x, z$ ——如图5。

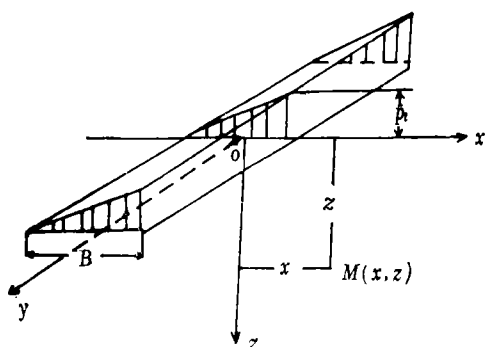


图 5 条形基础受三角形荷载作用

5. 圆形基础受均布荷载作用时中心点以下地基土的平均附加应力系数

$$k = z + 2R - \frac{z^2 + 2R^2}{\sqrt{z^2 + R^2}} \quad (15)$$

$$\bar{\alpha} = k/z \quad (16)$$

将式(1)~(3)、式(6)、式(8)~(16)相结合,可编制一程序(程序略)计算出地基土的不均匀系数,判别地基土的均匀性。

### (三)砂卵石压缩模量的确定

在地基均匀性判别中需要确定地基土的压缩模量 $E_s$ 值,对于粘性土和粉土我们可以按实际应力情况进行土的压缩试验,确定土的压缩模量,但对于砂类土和碎石类土难于确定其压缩模量值。

B. O. Hardin<sup>[3]</sup>在1987年根据粗粒土的矿物成份,粒度组成,颗粒磨圆度,起始孔隙比,相对密度和作用压力估算压缩模量 $E_s$ ,其应力应变关系的数学模型为:

$$\frac{1}{e} = \frac{1}{e_0} + \frac{1}{S_D} \left( \frac{\sigma_v}{p_a} \right)^{0.5} \quad (17)$$

$$S_D = k_D \left( 1 + \frac{D_r}{2} \right) \left( 1 + \frac{700}{n_s} \cdot \frac{d_{40}}{d_{60}} \right) \quad (18)$$

式中  $e_0$ —— $\sigma_v$ 为零时土的孔隙比,按表2采用;

表 2 砂类土的 $e_0$ 值

土 的 种 类	密 实 度			
	密实	中 密	稍 密	松
粉砂、细砂	<0.70	0.70~0.85	0.85~0.95	>0.95
中砂、粗砂、砾砂	<0.60	0.65~0.75	0.75~0.85	>0.85

$\sigma_v$ ——竖向有效应力(kPa);

$p_a$ ——大气压(kPa);

$S_D$ ——无量纲参数,它与土的组成、物理状态有关;

$k_D$ ——矿物成份因素,正长石31,石英27等;

$D_r$ ——土的相对密度;

$n_s$ ——颗粒形状系数,角状25,圆状15,中间状态内插;

$d_{40}, d_{60}$ ——分别为较小颗粒占全部颗粒重量的40%和90%的粒径。

按式(17)可计算出土在自重应力 $\sigma_{v1}$ 与自重应力和附加应力之和 $\sigma_{v2}$ 作用下的孔隙比 $e_1, e_2$ ,我们可得出:

$$E_s = (H e_0) \cdot \frac{\sigma_{v2} - \sigma_{v1}}{e_1 - e_2} \quad (19)$$

由式(19)可计算出砂类土的 $E_s$ 值。

郝春英、马兰等人在研究北京地区无粘性土的特征基础上,利用B. O. Hardin一维模型公式,给出了砂类土、卵石的压缩模量计算公式:

$$E_s = \frac{(1 + e_0) \cdot p_0}{C_0 \cdot \lg \left( \frac{\sigma'_v + p_0}{\sigma'_v} \right)} \times 10^{-3} \quad (20)$$

式中  $E_s$ ——土的压缩模量(MPa);

$e_0$ ——有效覆盖压力为零时的孔隙比,砂土按表3取值,卵石按表4取值;

$C_0$ ——压缩指数,砂土按表3取值,卵石按表4取值;

表 3 砂土(粉、细、中砂) $C_c$ 值

密 实 度		有 效 覆 盖 压 力 $\sigma'_v$ , kPa									
		100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
稍密	$D_r=35\%$	0.028	0.036	0.042	0.048	0.052	0.056	0.060	0.062	0.065	0.067
	$e_s=0.85$										
中密	$D_r=65\%$	0.019	0.025	0.029	0.033	0.036	0.039	0.042	0.044	0.046	0.048
	$e_s=0.75$										
密实	$D_r=85\%$	0.014	0.018	0.021	0.024	0.026	0.028	0.030	0.032	0.034	0.036
	$e_s=0.65$										

表 4 卵 石 的  $C_c$  值

密 实 度		有 效 覆 盖 压 力 $\sigma'_v$ , kPa									
		100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
稍密	$D_r=35\%$	0.014	0.018	0.022	0.024	0.027	0.027	0.031	0.033	0.034	0.036
	$e_s=0.50$										
中密	$D_r=65\%$	0.010	0.013	0.015	0.017	0.019	0.021	0.022	0.024	0.025	0.026
	$e_s=0.45$										
密实	$D_r=85\%$	0.008	0.010	0.012	0.013	0.014	0.015	0.016	0.017	0.019	0.020
	$e_s=0.40$										

$\sigma'_v$ ——有效覆盖压力(kPa);

$p_0$ ——基础底面处附加应力标准值;

$p_0 = 100 \text{ kPa}$ 。

### 三、实例

某场地拟建 6 幢 18~25 层的高层建筑, 带 2 层地下室, 室内地坪标高 44.20m, 基础埋深土 0.00 以下 7.00m, 设计要求按 20kPa/层考虑基底压力, 场地内共布置 8 个深的取土孔, 基底以下各层土的压缩模量按其所受的应力情况取值, 粉、细砂、细、中砂的压缩模量按式(20)计算, 各层土的压缩模量及其厚度见表 5。

将表 5 中的数值、基础尺寸及各钻孔所在位置参数、基础类型输入计算机程序, 可计

算出压缩模量当量的平均值  $\bar{E}_s = 13.98 \text{ MPa}$ , 最大值  $\bar{E}_{s, \max} = 16.37 \text{ MPa}$ , 最小值  $\bar{E}_{s, \min} = 10.83 \text{ MPa}$ , 地基土不均匀系数  $\beta = 1.51$ , 查表 1 可得  $\beta_{\text{查}} = 1.76$ ,  $\beta < \beta_{\text{查}}$ , 因而该场地地基土属于均匀性地基土。

### 四、结论

本文将地基平均附加应力系数与附加应力系数沿土层厚度的积分相结合, 编制了不同基础受不同荷载时地基土均匀性判别程序, 按 B.O. Hardin 或郝春英、马兰的计算砂卵石压缩模量的程序[4], 计算了某场地的砂类土的压缩模量, 并对该场地地基土的均匀性做了判别, 其结果为该场地为均匀性地基土。

表 5 E<sub>s</sub>及土层厚度一览表

孔 号 土 层	No.1		No.3		No.4		No.6		No.8		No.11		No.27		No.30	
	E <sub>s</sub> (MPa)	h (m)	E <sub>s</sub> (MPa)	h (m)	E <sub>s</sub> (MPa)	h (m)	E <sub>s</sub> (MPa)	h (m)	E <sub>s</sub> (MPa)	h (m)	E <sub>s</sub> (MPa)	h (m)	E <sub>s</sub> (MPa)	h (m)	E <sub>s</sub> (MPa)	h (m)
粉质粘土④	13.0	0.8	12.9	2.20	9.8	2.7	9.5	1.0	12.7	0.9	11.0	1.4	3.0	1.25	0.0	0.0
重粉质粘土⑤	6.8	2.7	5.9	1.3	4.4	0.8	6.2	1.1	5.9	2.2	7.0	1.7	5.0	1.4	5.7	3.13
粉质粘土⑥	8.3	1.0	9.0	1.9	14.5	1.8	19.2	5.5	19.2	3.4	12.4	2.9	11.9	3.9	15.4	3.7
粉、细砂⑦	13.4	1.6	13.5	1.5	13.8	1.9		0.0		0.0	13.8	1.6		0.0		0.0
重粉质粘土⑧	8.2	2.6	6.7	1.6	7.1	1.7	9.3	1.9	8.3	1.9	10.8	1.0	5.9	2.1	7.8	1.8
粉质粘土⑧ <sub>1</sub>	8.2	1.1	8.0	2.4	15.2	1.8	9.4	2.1	12.7	2.6	17.6	3.5	17.6	2.4	21.2	2.9
粉质粘土⑧ <sub>2</sub>	10.4	2.8	14.2	2.2	11.8	2.1	9.8	2.7	10.0	2.0	17.3	1.5	10.8	2.2	10.8	1.6
重粉质粘土⑧ <sub>1</sub>	14.0	2.8	13.9	3.2	11.8	4.1	13.7	2.8	10.4	2.1	13.3	2.5	10.8	2.8	11.8	2.5
细、中砂⑨	57.0	9.7	57.0	10.5	57.0	9.4	57.0	10.3	57.0	7.0	57.0	9.9	57.0	8.0	57.0	11.1
粉质粘土⑩	9.9	4.0	9.9	4.0	16.4	4.0	9.4	4.0	23.1	4.0	20.7	6.1	23.1	4.0	12.3	4.0

## 参 考 文 献

- 1 北京地区建筑地基基础勘察设计规范 (DBJ 01—501—92). 1992年11月
- 2 陈希哲著.《土力学地基基础》. 清华大学出版社, 1987
- 3 Bobby O. Hardin, 1-D strain in normally consolidated cohesionless soils, 《Journal of American Geotechnical》 ASCE, Vol. 113, GT. 12, 1987
- 4 郝春英、马兰. 用计算方法确定砂、卵石侧限压缩模量. 《工程勘察》, No. 3, 1993



(上接第10页)

效益有重大作用。

2. 节约了大量投资, 效益显著 (见表7), 受到建设单位、施工单位、质检部门的好评。

3. 对该厂区今后的新建工程的设计提

供了极其宝贵的经验和理论依据。

4. 据建设、施工单位反映, 在廊坊地区, 框排架结构采用天然地基尚属首例。

5. 基础施工工期缩短3个月, 工厂提前投入生产, 取得良好的间接经济效益。

表 7 科学实验后基础经济效益比较表

	原勘察报告基础方案	科学实验后基础方案	科学实验后基础方案节约费用
地基承载力	$f_k = 70 \text{ kPa}$	$f_k = 120 \text{ kPa}$	
碎石挤密桩	$f_k = 150 \text{ kPa}$		
碎石挤密桩费用	$5514 \text{ m}^3 \times 100 \text{ 元/m}^3 = 55.14 \text{ 万元}$	天然地基	
钢筋砼用量	$807 \text{ m}^3 \times 303 \text{ 元/m}^3 = 24.45 \text{ 万元}$	$990 \text{ m}^3 \times 314 \text{ 元/m}^3 = 31.1 \text{ 万元}$	
试验费	无	2.5万元	
合计	79.59万元	33.6万元	$79.59 - 33.6 = 45.99 \text{ 万元}$

注: 上表按1990年定额取费标准计算。