建筑结构设计新编

地基基础设计

殷志建　主编
殷志建　杨俊悌　编
郑洪国　审校

安徽科学技术出版社

建筑结构设计新编

地基基础设计

殷志建　主编
殷志建　杨俊悌　编
郑洪国　审校

安徽科学技术出版社

责任编辑：范　源
封面设计：王士龙

建筑结构设计新编（丛书之四）
地基基础设计
殷志建　主编
殷志建　杨俊悌　编
郑洪国　审校
*
安徽科学技术出版社出版
（合肥市跃进路1号）
新华书店经销　　安徽新华印刷厂印刷
*
开本：787×1092　1/32　印张：8.75　字数：192,000
1988年1月第1版　1988年1月第1次印刷
印数：00,001—15,000
ISBN7-5337-0105-5/TU·5　　定价：1.85元

前　言

《工业与民用建筑地基基础设计规范》(TJ7-74)是我国第一本地基基础设计规范。自颁发以来至今已有10余年。它对工业与民用建筑地基基础设计起到了积极作用。但在执行过程中，也发现存在一些问题。

《建筑结构设计统一标准》(GBJ68-84)的颁发，促进了对现行设计规范的全面修订，地基基础规范组的同志们为此提出了20个专题，对原规范中存在的问题进行了系统的调研。作为规范修订的基础和背景资料，这20个专题报告名目如下：

1.一般土的分类与定名；

2.低塑性土地基承载力表；

3.红粘土的定名与承载力；

4.地基土的力学性质、指标与可靠性的分析取值；

5.地基容许承载力的计算公式中参数c,ϕ值确定；

6.中国标准冻深线图编制；

7.地基土冻胀性分类、防冻害措施；

8.高烟囱基础容许倾斜值；

9.地基压缩层深度确定；

10.沉降计算经验系数m_s值；

11.软弱下卧层的验算；

12.边坡上建筑物基础到坡脚的水平距离；

13.岩溶土洞；

目　录

第一章　地基土指标的可靠性分析 …… 1
第一节　地基土指标的抽样估计 …… 1
第二节　地基土指标的变异性 …… 6
第三节　地基容许承载力的可靠性 …… 9
第四节　基础最终沉降量的可靠性 …… 14
第二章　关于低塑性土地基承载力 …… 19
第一节　对地基承载力建表问题的分析 …… 19
第二节　回归分析的一般方法 …… 21
第三节　低塑性土地基承载力与物理指标的相关性分析 …… 38
第四节　承载力表的回归方程 …… 41
第五节　承载力表取值方法 …… 42
第三章　地基容许承载力计算公式及抗剪强度指标 c，ϕ值的确定 …… 53
第一节　地基容许承载力计算公式 …… 53
第二节　关于承载力系数的讨论 …… 63
第三节　用三轴试验确定c，ϕ值及其变化规律 …… 68
第四节　c，ϕ值与U的回归方程 …… 74
第五节　试算比较 …… 75
第四章　软弱下卧层的验算 …… 77
第一节　概述 …… 77
第二节　双层地基模型试验 …… 79

第三节　α与θ的关系 …………………………………………… 85
第五章　沉降计算公式及其参数的确定………………………… 86
第一节　概述…………………………………………………… 86
第二节　规范推荐的地基变形计算公式的推导 ………………… 87
第三节　沉降计算经验系数 ……………………………………… 101
第四节　压缩模量E_s的取用 ……………………………………… 104
第五节　地基压缩层范围内压缩模量的加权平均值…………… 106
第六节　m_s与E_s的相互关系 ……………………………………… 109
第七节　地基压缩层的实测深度………………………………… 111
第八节　Z_0/b-b回归线分析 ……………………………………… 116
第九节　地基压缩层的计算深度………………………………… 120
第六章　地基上梁和板的计算…………………………………… 128
第一节　地基计算模型 …………………………………………… 128
第二节　弹性地基梁分析解法…………………………………… 131
第三节　地基基床系数K值的确定 ……………………………… 177
第四节　地基梁的数值解法 ……………………………………… 193
第五节　地基上板的数值解法 …………………………………… 204
第六节　柱下条形基础设计 ……………………………………… 217
第七节　柱下十字交叉基础计算………………………………… 227
第八节　筏片基础设计 …………………………………………… 234
第九节　筏片基础计算实例 ……………………………………… 253

第一章　地基土指标的可靠性分析

第一节　地基土指标的抽样估计

地基的现场勘探和室内土工试验的目的在于评价地基土的性状和提供设计参数。地基土设计参数的可靠性直接关系到地基基础工程的设计质量。但是，在实际工作中只能根据有限数量的随机抽样试验结果（子样）来估计地基土（总体）的设计参数，而如何分析其可靠性，也就是说评价在多大程度上反映了地基土的实际性状，是概率极限状态设计准则的前提，也是可靠性分析的基础。

根据统计数学中的格利文科（W.Glirenko）定理：当子样数 $n\to\infty$时，子样的概率分布函数$F_n(x)$依概率1关于x均匀地收敛于总体概率分布函数 $F(x)$，即

$$P\left\{\lim_{n\to\infty}\ \mathrm{SUP}_{-\infty<x<+\infty}\left|F_n(x)-F(x)\right|=0\right\}=1 \tag{1-1}$$

因此，当n相当大时，样本$F_n(x)$实际上将近似地等于总体的$F(x)$，这就是我们可以用样本推断总体的理论依据。

由此，我们就可以用子样的平均值

$$\overline{x}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}x_i \tag{1-2}$$

和子样的标准差

$$\hat{\sigma} = \sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(x_i - \overline{x})^2} \tag{1-3}$$

去估计总体的均值和均方差。

子样的平均值$\overline{x}$虽然是总体均值的一个近似、无偏估计，但不能将$\overline{x}$直接作为设计参数，因为这样做的可靠性太低。总体为正态分布时，总体的取值将有50%低于或者高于子样的平均值$\overline{x}$，也就是说超越概率为0.5。

若要具有一定的可靠度（β），也就是我们所承担的风险是一个小概率（$1-\beta$）事件，则设计参数的可靠性取值，可用下式求得

$$\hat{x} = \overline{x}\left(1 \pm \frac{t_\beta}{\sqrt{n}} V_x\right) \tag{1-4}$$

$$\overline{x} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i$$

$$V_x = \frac{\overline{\sigma}_x}{\overline{x}}$$

式中，$\hat{x}$——相应于β时的设计参数。

$\overline{x}$——平均值。

V_x——x的变异系数。

n——数据的数量，在统计学中称样本容量。

t_β——取可靠性为β时的学生氏函数临界值。

为了与习惯上的安全系数在表达形式上的一致，我们采用统计安全系数的名词，令K_s表示统计安全系数，则

$$K_s=\frac{1}{1\pm\frac{t_\beta}{\sqrt{n}}V_x} \tag{1-5}$$

$$\hat{x}=\frac{\overline{x}}{K_s} \tag{1-6}$$

对于诸如抗剪强度指标c、ϕ，压缩模量E_s，容量γ一类指标，

$$K_s=\frac{1}{1-\frac{t_\beta}{\sqrt{n}}V_x} \tag{1-7}$$

统计安全系数 K_s 恒大于1。

对于诸如压缩系数a、孔隙比e、含水量w一类指标，

$$K_s=\frac{1}{1+\frac{t_\beta}{\sqrt{n}}V_x} \tag{1-8}$$

统计安全系数K_s恒小于1。

在地基设计中，计算地基容许承载力和地基变形时需要考虑土的指标的可靠性。有两种处理问题的途径，第一种途径是先用上述方法计算出指标的可靠性估值，再代入地基规范公式计算地基容许承载力的估值$\hat{R}_s$和地基变形的估值$\hat{S}$；第二种途径先用指标的平均值代入地基规范公式计算地基容许承载力的平均值$\overline{R_s}$和地基变形的平均值$\overline{S}$，再考虑指标的标准差在计算公式中的传递，以求得地基容许承载力的标准差$\hat{\sigma}_{R_s}$和地基变形的标准差$\hat{\sigma}_s$。最后用下式计算估值：

$$\hat{R}_s=\frac{\overline{R_s}}{K_s} \tag{1-9}$$

$$K_s=\frac{1}{1-\frac{t_\beta}{\sqrt{n}}V_{R_s}} \tag{1-10}$$

$$\hat{S}=\frac{\overline{S}}{K_s} \tag{1-11}$$

$$K_s=\frac{1}{1+\frac{t_\beta}{\sqrt{n}}V_s} \tag{1-12}$$

前一种途径将可靠性分析放在提供参数阶段考虑，而在计算地基容许承载力和变形时则不再作可靠性分析，其计算方法与传统方法没有什么两样，不过仅对计算结果赋予可靠性的含义。这种方法比较简单，易于人们接受和采用。

后一种途径的数据处理阶段只提供统计参数，将可靠性分析放在土力学计算中进行，概念和方法都比较严格，易于过渡到概率极限状态设计，但这种计算过程比前一种复杂一些，与习惯方法差别较大。

在计算设计参数的可靠性估值时，对不同的情况可取不同的可靠性β值。对于计算地基承载力的情况，β值可取0.95；对于计算变形的情况，β值可取0.85。

t_β值可从表1-1按自由度ν和可靠性β值取用。

表1-1 临 界 值 t_β

自由度 ν	当β为不同数值时的学生氏函数临界值t_β				
	0.85	0.90	0.95	0.98	0.99
2	1.34	1.89	2.92	4.87	6.96
3	1.25	1.64	2.35	3.45	4.54

续表

4	1.19	1.53	2.13	3.02	3.75
5	1.16	1.48	2.01	2.71	3.36
6	1.13	1.44	1.91	2.63	3.14
7	1.12	1.41	1.90	2.54	3.00
8	1.11	1.40	1.86	2.49	2.90
9	1.10	1.38	1.83	2.44	2.82
10	1.10	1.37	1.81	2.40	2.76
11	1.09	1.36	1.80	2.36	2.72
12	1.08	1.36	1.78	2.33	2.68
13	1.08	1.35	1.77	2.30	2.65
14	1.08	1.34	1.76	2.28	2.62
15	1.07	1.34	1.75	2.27	2.60
16	1.07	1.34	1.75	2.26	2.58
17	1.07	1.33	1.74	2.25	2.57
18	1.07	1.33	1.73	2.24	2.55
19	1.07	1.33	1.73	2.23	2.54
20	1.06	1.32	1.72	2.22	2.53
25	1.06	1.32	1.71	2.19	2.49
30	1.05	1.31	1.70	2.17	2.46
40	1.05	1.30	1.68	2.14	2.42
60	1.05	1.30	1.67	2.12	2.39

第二节　地基土指标的变异性

设土的设计参数（如压缩模量E_s，内摩擦角ϕ、内聚力c）为y；原位测试结果（如标贯击数N，比贯入阻力P_s）为x，则估计设计参数的经验公式为

$$y=a+bx \tag{1-13}$$

若已知平均值x_0，变异系数V_x，样本容量n_0，则设计参数估值由下式计算：

$$\hat{y}=(a+b\overline{x}_0\pm t_\beta\overline{\psi}\hat{\sigma})\eta \tag{1-14}$$

$$\eta=1\pm\frac{t_\beta}{\sqrt{n_0}}KV_x$$

$$K=\frac{b\overline{x}_0}{a+bx_0}$$

$$\overline{\psi}=\frac{1}{\sqrt{n}}(1+Z^2)^{\frac{1}{2}}$$

$$Z=\frac{\overline{x}_0-\overline{x}}{\hat{\sigma}_x}$$

式中，$\hat{\sigma}_x$——建立经验公式的数据自变量x的标准差。

$\overline{x}$——建立经验公式的数据自变量x的平均值。

$\hat{\sigma}$——经验公式的剩余标准差。

n——建立经验公式的数据组数。

设计参数y的变异系数V_y由下式计算：

$$V_y=KV_x \tag{1-15}$$

式中，K——误差传递系数。当经验公式为非线性时，K由表1-2所给出的公式计算。

表1-2 误差传递系数K的计算公式

经验公式	误差传递系数K
$Y=a\exp bx^{-1}$	$K=-bx^{-1}$
$Y=\dfrac{x}{ax-b}$	$K=\dfrac{b}{ax-b}$
$Y=ax^{-b}$	$K=-b$
$Y=a+x^{\frac{1}{2}}$	$K=\dfrac{1}{2}\dfrac{x^{\frac{1}{2}}}{a+x^{\frac{1}{2}}}$

对于抗剪强度指标c和ϕ可应用最小二乘法对若干组试验结果一次求得c和ϕ这两个指标的均值和标准差。

若分别在k个不同的竖直压力p(对于直剪)或k个不同周围压力σ_3(对于三轴试验)作用下剪切共有n组试验，每组试验有k个试样，则共有$m=k\times n$对数据，即m个p_i值和m个τ_i值。

1.对于直剪试验，c的均值

$$\overline{c}=\frac{1}{\Delta}\left(\sum_{i=1}^{m}\tau_i\sum_{i=1}^{m}p_i^2-\sum_{i=1}^{m}p_i\sum_{i=1}^{m}\tau_ip_i\right) \tag{1-16}$$

tgϕ的均值

$$\overline{\mathrm{tg}\phi}=\frac{1}{\Delta}\left(m\sum_{i=1}^{m}\tau_ip_i-\sum_{i=1}^{m}\tau_i\sum_{i=1}^{m}p_i\right) \tag{1-17}$$

$$\Delta=m\sum_{i=1}^{m}p_i^2-\left(\sum_{n=1}^{m}p_i\right)^2$$

c的标准差

$$\hat{\sigma}_c = \hat{\sigma}_\tau \sqrt{\frac{1}{\Delta}\sum_{i=1}^{m} p_i^2} \tag{1-18}$$

$\mathrm{tg}\phi$ 的标准差

$$\hat{\sigma}_{\mathrm{tg}\phi} = \hat{\sigma}_\tau \sqrt{\frac{m}{\Delta}} \qquad \hat{\sigma}_\phi = \hat{\sigma}_{\mathrm{tg}\phi} \cos^2\phi \tag{1-19}$$

$$\hat{\sigma}_\tau = \sqrt{\frac{1}{m-2}\sum_{i=1}^{m}(p_i \mathrm{tg}\phi + c - \tau_i)^2}$$

2.对于三轴试验，令

$$p = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}, \quad \tau = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$$

则 ϕ 的均值

$$\overline{\phi} = \arcsin\left[\frac{m\sum_{i=1}^{m}\tau_i p_i - \sum_{i=1}^{m}\tau_i \sum_{i=1}^{m} p_i}{\Delta}\right] \tag{1-20}$$

c 的均值

$$\overline{c} = \frac{\sum_{i=1}^{m}\tau_i \sum_{i=1}^{m} p_i^2 - \sum_{i=1}^{m} p_i \sum_{i=1}^{m}\tau_i p_i}{m\sum_{i=1}^{m}\tau_i p_i - \sum_{i=1}^{m}\tau_i \sum_{i=1}^{m} p_i} \mathrm{tg}\phi \tag{1-21}$$

$$\Delta = m\sum_{i=1}^{m} p_i^2 - \left(\sum_{i=1}^{m} p_i\right)^2$$

$\mathrm{tg}\phi$的标准差

$$\hat{\sigma}_{\mathrm{tg}\phi} = \hat{\sigma}_\tau \sqrt{\frac{m}{\Delta}} \cdot \frac{1}{\cos\phi} \tag{1-22}$$

c 的标准差

$$\hat{\sigma}_c = \hat{\sigma}_\tau \sqrt{\frac{1}{\Delta}\sum_{i=1}^{m} p_i^2}\ \frac{1}{\cos\phi} \tag{1-23}$$

$$\hat{\sigma}_{\tau}=\sqrt{\frac{1}{m-2}\sum_{i=1}^{m}(p_i\mathrm{tg}\phi+c-\tau_i)^2}$$

在求得 tgϕ 的标准差$\hat{\sigma}_{\mathrm{tg}\phi}$后，用下式计算$\phi$的标准差$\hat{\sigma}_{\phi}$：

$$\hat{\sigma}_{\phi}=\hat{\sigma}_{\mathrm{tg}\phi}\cos\phi$$

此式对直剪和三轴试验均适用。

压缩模量平均值$\overline{E}_s$计算公式为

$$\overline{E}_s=\frac{\sum_{i=1}^{n}E_{si}}{n} \tag{1-24}$$

标准差计算公式为

$$\hat{\sigma}_{E_s}=\sqrt{\frac{n\sum_{i=1}^{n}E_{si}^2-\left(\sum_{i=1}^{n}E_{si}\right)^2}{n(n-1)}} \tag{1-25}$$

式中，n——压缩模量E_{s_i}的数目。

第三节　地基容许承载力的可靠性

工业与民用建筑地基基础设计规范第16条给出了计算容许承载力的公式

$$R_S=N_B\gamma B+N_D\gamma_P D+N_C c \tag{1-26}$$

式中，B——基础宽度。

D——基础埋置深度。

γ——持力层土的容量。

γ_P——基础底面以上土的容量。

c——土的内聚力。

N_B，N_D，N_C——承载力系数，是内摩擦角ϕ的函数。

对地基容许承载力作可靠性分析、计算可靠性估值$\hat{R}_s$时，需要考虑土工指标的标准差在计算公式中的传递，计算地基容许承载力的标准差$\hat{\sigma}_{R_s}$。鉴于土的容量的变异系数较小，计算时为了简化而忽略它的影响，只考虑c，ϕ两个变量，标准差的计算公式为

$$\hat{\sigma}_{R_s}=\left[\sigma_\phi^2\left(\frac{\partial R_s}{\partial\phi}\right)^2+\hat{\sigma}_c^2\left(\frac{\partial R_s}{\partial c}\right)^2\right]^{\frac{1}{2}}$$

$$=\left[\sigma_\phi^2\left(\gamma B\frac{dN_B}{d\phi}+\gamma_P D\frac{dN_D}{d\phi}+C\frac{dN_C}{d\phi}\right)+\sigma_c^2N_c^2\right]^{\frac{1}{2}} \tag{1-27}$$

式中，$\hat{\sigma}_\phi$，$\hat{\sigma}_c$——内摩擦角和内聚力的标准差。

三个承载力系数对内摩擦角的一阶导数$\frac{dN_B}{d\phi}$、$\frac{dN_D}{d\phi}$和$\frac{dN_C}{d\phi}$值见表 1-3。其中，$\frac{dN_B}{d\phi}$是根据规范给出的经验修正了的承载力系数N_B值、拟合成函数后再求导数的。

表1-3 承载力系数及其对ϕ的一阶导数

内摩擦角 ϕ 度	N_B	N_D	N_C	$\frac{dN_B}{d\phi}$	$\frac{dN_D}{d\phi}$	$\frac{dN_C}{d\phi}$
0	0	1.00	3.14	0.79	3.14	4.93
2	0.03	1.12	3.32	0.88	3.51	5.27
4	0.06	1.25	3.51	0.98	3.92	5.64

续表

6	0.10	1.39	3.71	1.10	4.39	6.05
8	0.14	1.55	3.93	1.23	4.92	6.49
10	0.18	1.73	4.17	1.38	5.53	6.98
12	0.23	1.91	4.42	1.56	6.22	7.53
14	0.29	2.17	4.69	1.75	7.01	8.13
16	0.36	2.43	5.00	1.98	7.92	8.80
18	0.43	2.72	5.31	2.24	8.97	9.55
20	0.51	3.06	5.66	2.80	10.19	10.39
22	0.61	3.44	6.04	3.90	11.60	11.32
24	0.80	3.87	6.45	5.80	13.24	12.38
26	1.10	4.37	6.90	8.20	15.16	13.57
28	1.40	4.93	7.40	10.80	17.42	14.92
30	1.90	5.59	7.95	14.56	20.09	16.46
32	2.50	6.35	8.55	18.80	23.27	18.21
34	3.20	7.21	9.22	24.55	27.06	20.23
36	4.20	8.25	9.97	32.25	31.61	22.55
38	5.50	9.44	10.80	42.32	37.12	25.25
40	7.20	10.81	11.73	55.18	43.82	28.40

为了分析各个因素对容许承载力可靠性估值的影响，我们将容许承载力估值$\widehat{R}_s$与均值$\overline{R}_s$之比作为衡量变异影响的指标，可称为折减系数。折减系数愈小表示由于指标变异性的影响使估值降低得愈多；折减系数等于 1 表示估值等于均值，即不考虑指标变异性的影响。