

铁道结构材料强度质量的统计分析

陆 龙 文 执 笔

(结构教研室)

在以概率理论为基础的极限状态设计方法中,认为结构构件的作用效应 S 与结构构件抗力 R 都是随机变量,结构构件的可靠裕度 $Z = R - S = 0$ 作为极限状态设计方程。我国《建筑设计统一标准》规定用可靠指标 β 来度量结构构件的可靠度,若 R 与 S 均服从正态分布,则

$$\beta = \frac{m_z}{\sigma_z} = \frac{m_R - m_S}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}} \dots\dots\dots (1)$$

式中 m_R 、 σ_R 分别为结构构件抗力为正态分布或当量正态分布时的平均值和标准差; m_S 、 σ_S 分别为综合作用效应为正态分布或当量正态分布时的平均值和标准差。

结构的失效概率 P_f 与 β 具有下列关系:

$$P_f = P(Z < 0) = \int_{-\infty}^0 \frac{1}{\sigma_z \sqrt{2\pi}} x^{-\frac{(Z-m_z)^2}{2\sigma_z^2}} dz \dots\dots\dots (2)$$

$$\text{令 } Z^* = \frac{Z - m_z}{\sigma_z} = \frac{Z}{\sigma_z} - \frac{m_z}{\sigma_z}$$

$$d(Z^*) = \frac{dz}{\sigma_z}$$

当 $Z = 0$ 时 $Z^* = -\beta$, $Z = -\infty$ 时 $Z^* = -\infty$ 代入式(2)得:

$$P_f = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{-\beta} e^{-\frac{Z^{*2}}{2}} dZ^* = \Phi(-\beta)$$

这里所指为标准正态分布函数,由于 β 与 P_f 相对应,求得 β 就知 P_f 值。这种设计准则可以使各种建筑结构的构件设计,在同一原则下统一起来。我们“铁道建筑结构可靠度”也是在这一准则下进行分析 and 研究的。

结构抗力的基本变量

对于 R 和 S 这两大基本变量中,我们对 R 这个基本变量在铁路系统一些部门进行调研,统计。

$$\text{从式(1),若令 } \alpha_R = \frac{\sigma_R}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}}, \quad \alpha_S = \frac{\sigma_S}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}}$$

* 参加调研与统计人员还有万小芸、黄子云、程林、许家修、周飞达、柳建华、廖晓明。
本文于1984年9月15日收到

则可得 $m_R - \alpha_R \cdot \beta \cdot \sigma_R = m_S + \alpha_S \cdot \beta \cdot \sigma_S$ (3) 指

若S的统计参数已知, 则上式即是对结构抗力R所要求的表达式, 也就是说在所要求可靠指标 β 下, R的统计参数 m_R 和 σ_R 间所要满足的关系。若以简单受力的混凝土受压短柱来分析:

$$R = K_0 \cdot K_A \cdot K_P \cdot f \cdot C \cdot A_K$$

式中: $K_0 \cdot f \cdot C$ ——混凝土构件内棱柱强度, 其中 f 为混凝土立方体试件强度; C 为棱柱强度对立方体强度换算系数; K_0 为构件内材性与试件比值的不定性系数。

$K_A \cdot A_K$ ——为构件实际截面面积, 其中 A_K 为设计截面面积, K_A 为几何尺寸不定性系数。

K_P ——为设计时采用的计算模式不定性系数。

令总的不定性系数 $K_Z = K_0 \cdot K_A \cdot K_P$

$$\text{则 } R = K_Z \cdot f \cdot C \cdot A_K$$

这时 K_Z 和R的统计参数各为:

$$m_{KZ} = m_{K0} \cdot m_{KA} \cdot m_{KP}$$

$$V_{KZ}^2 = V_{K0}^2 + V_{KA}^2 + V_{KP}^2 \quad (V \text{ 为变异系数})$$

$$m_R = m_{KZ} \cdot m_f \cdot m_C \cdot A_K$$

$$\sigma_R^2 = m_{KZ}^2 \cdot m_f^2 \cdot m_C^2 \cdot A_K^2 (V_f^2 + V_{KZ}^2)$$

将上述统计参数代入式(3), 得

$$m_{KZ} \cdot m_f \cdot m_C \cdot A_K \left(1 - \alpha_R \beta \sqrt{V_f^2 + V_{KZ}^2} \right) = m_S + \alpha_S \cdot \beta \cdot \sigma_S$$

由于《建筑设计统一标准》中采用的分项系数设计表达式为:

$$\gamma_R [\gamma_G C_G G_K + \gamma_{Q1} C_{Q1} Q_{1K} + \sum_{i=2}^n \gamma_{Qi} \cdot \psi_{0i} \cdot C_{Qi} \cdot Q_{iK}] = \frac{R_R}{\gamma_R}$$

上式左边为作用效应项, R_K 为抗力R标准值, γ_R 为抗力分项系数。对应以上两式, 令

$$\frac{m_{KZ} \cdot m_f \cdot m_C \cdot A_K \left(1 - \alpha_R \beta \sqrt{V_f^2 + V_{KZ}^2} \right)}{R_K / \gamma_R} = \frac{m_S + \alpha_S \cdot \beta \cdot \sigma_S}{\gamma_R [\gamma_G C_G G_K + \gamma_{Q1} C_{Q1} Q_{1K} + \dots]} = \xi$$

$$\therefore m_{KZ} \cdot m_f \cdot m_C \cdot A_K \left(1 - \alpha_R \cdot \beta \sqrt{V_f^2 + V_{KZ}^2} \right) = \xi \cdot \frac{R_K}{\gamma_R}$$

而 $R_K = f_K \cdot A_K$ (f_K 为试件材性标准值)

$$\therefore m_{KZ} \cdot m_f \cdot m_C \left(1 - \alpha_R \cdot \beta \sqrt{V_f^2 + V_{KZ}^2} \right) = \frac{\xi \cdot f_K}{\gamma_R} \dots \dots \dots (4)$$

式(4)是用于R、S为正态分布时结构材料质量要求的表达式。

对于R、S为对数正态分布时, 从

$$\beta = \frac{l_R m_R - l_S m_S}{\sqrt{V_R^2 + V_S^2}}$$

同样可得出表达式:

$$m_{KZ} \cdot m_f \cdot m_C \times p(-\alpha_R \cdot \beta \cdot V_R) = \frac{\xi \cdot f_K}{\gamma_R} \dots \dots \dots (5)$$

$$\text{式(5)中: } V_R = \sqrt{V_{KZ}^2 + V_f^2 + V_C^2}$$

$$\alpha_R = \frac{V_R}{\sqrt{V_R^2 + V_f^2}}, \quad \alpha_S = \frac{V_S}{\sqrt{V_R^2 + V_S^2}}$$

按照式(4)与式(5)一些主要统计参数,华东交通大学结构教研室调查铁道系统10个桥梁厂、铁路局和工程局,抽取1980年至1983年生产的150号、200号、250号、300号、400号、500号混凝土以及I级、II级钢筋,φ3高强钢丝的33300个数据进行统计,得出材料试件强度统计参数如下面表1:

表1 材料试件强度统计参数

材料	级 别	标准值 f_K (K_g/Cm^2)	平均值 m_f (K_g/Cm^2)	标准差 σ_f (K_g/Cm^2)	变异系数 V_f
混 凝 土	150号	129	205	38	0.185
	200号	134	272	69	0.253
	250号	192	314	61	0.194
	300号	259	363	52	0.143
	400号	368	480	56	0.117
	500号	430	558	64	0.115
钢 筋	I 级	2319	2801	241	0.086
	II 级	3349	4069	360	0.083
钢丝	φ3 高强钢丝	14916	17584	1334	0.076

注:上述统计中,用正态分布假设,通过K—S检验都不拒绝正态分布。标准值取平均值减去两倍标准差。

对于总的不定性系数 K_z 的统计,由于试验资料较少,取在经验数据基础上假设分布,对混凝土: K_0 一般采用三角形分布,以结构内材性比试件材性最多低35%,接近的最多,超出的很少,不计入,则

$$m_{K_0} = 0.88, \quad V_{K_0} = 0.09$$

K_A 一般采用正态分布,按构件类型与所在部位不同取

$$m_{K_A} = 0.9-1.1, \quad V_{K_A} = 0.04-0.065$$

K_P 采用均匀分布。

$$m_{KP} = 1, \quad V_{KP} = 0.05$$

若以混凝土短柱来分析, 取 $m_{KA} = 1, V_{KA} = 0.04$

$$\text{则: } m_{KZ} = 0.88 \times 1 = 0.88, \quad V_{KZ} = \sqrt{0.09^2 + 0.04^2 + 0.05^2} = 0.109$$

$$m_C = 0.8, \quad V_C = 0.08$$

对钢筋、钢丝, 因为结构内强度 f 与试件强度 f 的差别, 主要在于试件加荷速度不同的影响, 根据建科院研究采用建议值:

对 I 级钢筋取 $m_{KO} = 0.92, V_{KO} = 0.033$

对 II 级钢筋取 $m_{KO} = 0.95, V_{KO} = 0.028$

对钢筋丝取 $m_{KO} = 0.90, V_{KO} = 0.024$

对各级钢筋、钢丝取 $m_{KA} = m_{KP} = 1$

$$V_{KA} = 0.035, \quad V_{KP} = 0.04$$

故求得 I 级钢筋 $m_{KZ} = 0.92, V_{KZ} = 0.063$

II 级钢筋 $m_{KZ} = 0.95, V_{KZ} = 0.058$

钢丝 $m_{KZ} = 0.90, V_{KZ} = 0.069$

荷载取《统一标准》中可靠度校核时采用的荷载形式和参数, 包括恒载 G 和活载 Q 两种, 已知其参数为:

$$m_G = 1.06G_K, \quad V_G = 0.07$$

$$m_Q = 0.70Q_K, \quad V_Q = 0.29$$

荷载效应比 $\lambda = \frac{C_Q Q_K}{C_G G_K}$ 在 0.1—2.0 间认为均匀分布。(见表 2), 取 $\lambda = 0.1, 0.25, 0.50, 0.75, 1.00, 1.25, 1.50, 1.75, 2.00$ 九种按等权考虑, 设计表达式中荷载效应

项采用

$$\gamma_G \cdot C_G \cdot G_K + \gamma_Q \cdot C_Q \cdot Q_K, \quad \text{其中 } \gamma_G = 1.2, \gamma_Q = 1.4$$

若 R 和 S 都按对数正态分布, 则表达式见式 (5), 其中 α_R, ξ, γ_R 都与荷载情况有关。

$$\xi = \frac{m_S \cdot e \times p(\alpha_S \cdot \beta \cdot V_S)}{C_G G_K (\gamma_G + \lambda \gamma_Q)}$$

$$\text{这里 } m_S = m_{SG} + m_{SQ} = 1.06 C_G G_K + 0.7 C_Q Q_K = C_Q \cdot G_K (1.06 + 0.7\lambda)$$

$$\therefore \sigma_S^2 = \sigma_{SG}^2 + \sigma_{SQ}^2 = (1.06 C_G \cdot G_K \cdot 0.07)^2 + (0.7 C_Q \cdot Q_K \cdot 0.29)^2$$

$$\therefore V_S = \frac{\sigma_S}{m_S} = \sqrt{\frac{(0.0742)^2 + (0.203\lambda)^2}{1.06 + 0.7\lambda}}$$

对于 γ_R 则按设计表达式与现行规范一致性原则来定:

$$\therefore \gamma_G \cdot C_G G_K + \gamma_Q \cdot C_Q Q_K = \frac{R_k}{\gamma_R}$$

$$\text{而 } K (C_G \cdot G_K + C_Q \cdot Q_K) = R_k \quad (K \text{—现行规范安全系数对柱 } 1.55)$$

$$\therefore \gamma_R = \frac{K(1 + \lambda)}{\gamma_G + \lambda \gamma_Q}$$

设 V_i 在0.1—0.25间变化,取0.1、0.15、0.2、0.25四种按等权考虑, β 取统一标准中3.7考虑。按以上公式计算,即可得 α_R 、 ξ 及 γ_R 值,见表2。

铁道结构材料强度质量水平分析

对铁道结构材料——混凝土、钢筋、钢丝,按南方铁道系统中抽样调查进行统计所取得的强度统计参数(见表1)并根据前述结构抗力基本变量,按给定条件,通过表2中 α_R 、 ξ 、 γ_R 计算,用结构材料质量要求的表达式进行校核,得出它们的平均质量水平 β 与下限质量水平 β_1 ,详见表3——混凝土、钢筋、钢丝的平均质量和下限质量计算表。

这里对下限质量水平是按材料质量方程式计算:

$$m_i = f_k + \alpha \sigma_i$$

根据《统一标准》,式中材料性能保证率系数 α 取在材料性能概率分布中5%分位数上,即偏低率 P_k 取5%,这时相应的 $\alpha = 1.645$,从而得:

$$m_i = f_k + 1.645 \sigma_i$$

从表3计算结果来看,在取 $\alpha = 1.645$ 后,相应的质量水平 β_1 对于混凝土,可靠指标比平均质量水平 β 下降的平均数为0.43;对于钢筋,其下降的平均数为0.39;对于钢丝,下降的平均数为0.29。

按《统一标准》,可靠指标 β 分级的级差为0.5,即容许一级内差别为 $\beta \pm 0.25$,以 β 作为正常质量(即调查材料性能统计得出的平均质量水平),则下限质量水平 $\beta_1 = \beta - 0.25$,认为该水平与设计要求的材料质量下限是相应的,并以此来作为材料质量控制的基准。但从目前南方铁道系统结构材料调查统计来看,材料质量离散性较大,特别是混凝土生产情况较差,不能符合上述要求。今后必须在材料质量上进行提高,主要应从下列几方面采取措施:

1. 严格材料试件试验的规定程序,检验部门应独立于生产部门,有权对生产质量进行监督;
2. 对材料生产技术要进行改革,特别是现场生产技术,要采取科学的计量和施工技术、合理的施工程序;
3. 严格质量管理制度,从原材料验收至生产过程控制直到产品的最终检验,应按规定质量要求,使用各种质量控制的统计工具,及时记录和分析控制图,保证产品不超出 $\beta \pm 0.25$ 。

表 2 α_R, ξ, γ_R 计算表

$\lambda = \frac{C_Q Q_k}{C_G G_k}$		0.1	0.25	0.50	0.75	1.00	1.25	1.50	1.75	2.00
$\frac{m_s}{C_G G_k} = 1.06 + 0.7\lambda$		1.130	1.235	1.410	1.580	1.760	1.935	2.110	2.185	2.460
V_f	V_R	V_S	0.068	0.073	0.089	0.107	0.123	0.137	0.159	0.168
0.1	0.169	α_R α_S	0.929 0.373	0.918 0.397	0.885 0.466	0.845 0.535	0.809 0.588	0.777 0.628	0.729 0.685	0.709 0.705
0.15	0.203	α_R α_S	0.949 0.318	0.940 0.338	0.914 0.401	0.883 0.465	0.857 0.519	0.829 0.559	0.787 0.616	0.769 0.636
0.20	0.242	α_R α_S	0.964 0.271	0.957 0.289	0.938 0.345	0.917 0.405	0.890 0.452	0.871 0.493	0.835 0.548	0.820 0.570
0.25	0.285	α_R α_S	0.973 0.232	0.969 0.248	0.953 0.298	0.938 0.352	0.919 0.397	0.902 0.434	0.874 0.488	0.861 0.508
$\frac{m_s}{C_G G_k} e \times p(\alpha_S \beta V_S)$		0.954 0.299	0.946 0.318	0.923 0.378	0.896 0.440	0.869 0.489	0.845 0.529	0.824 0.560	0.806 0.584	0.790 0.605
$\gamma_G + \lambda \gamma_Q$		1.218	1.346	1.597	1.881	2.199	2.530	2.873	3.222	3.583
$\xi = \frac{m_s \times p(\alpha_S \beta V_S)}{C_G G_k (\gamma_G + \lambda \gamma_Q)}$		1.34	1.55	1.90	2.25	2.60	2.95	3.30	3.65	4.00
$\gamma_R = \frac{1.55(1+\lambda)}{\gamma_G + \lambda \gamma_Q}$		0.909	0.868	0.841	0.836	0.846	0.858	0.871	0.883	0.896
		1.272	1.250	1.224	1.206	1.192	1.182	1.174	1.168	1.163

$\alpha_R = 0.87$

$\alpha_S = 0.47$

$\xi = 0.87$

$\gamma_R = 1.20$

表 8 混凝土、钢筋、钢丝的平均质量和下限质量计算表

材 料	级 别	标 准 值 f_k (Kg/Cm ²)	不定性 I			换算系数 C		平均质量水平				下限质量水平			
			m_{kz}	V_{kz}	m_c	V_c	m_f (Kg/Cm ²)	σ_f (Kg/Cm ²)	V_f	β	$\bar{\beta}$	$m_f = f_k + 1.645\sigma_f$ (Kg/Cm ²)	V_f	β_f	$\bar{\beta}_f$
混 凝 土	R ^b = 150 #	$f_k = 129$ $f_k' = 0.7f_k = 90$	0.88	0.109	0.8	0.08	205	38	0.185			192	0.198		
	R ^b = 200 #	$f_k = 134$ $f_k' = 94$					164		0.201	3.76		153	0.214	3.31	
	R ^b = 250 #	$f_k = 192$ $f_k' = 134$	0.88	0.109	0.8	0.08	272	69	0.253			248	0.278		
							218		0.265	3.99		208	0.289	3.38	
	R ^b = 300 #	$f_k = 259$ $f_k' = 181$	0.88	0.109	0.8	0.08	314	61	0.193			292	0.209		
钢 筋	R ^b = 400 #	$f_k = 368$ $f_k' = 258$	0.88	0.109	0.8	0.08	290	52	0.164	3.60		267	0.171	3.24	
							480	56	0.111			460	0.122		
	R ^b = 500 #	$f_k = 430$ $f_k' = 301$	0.88	0.109	0.8	0.08	384		0.137	3.52		350	0.146	3.17	
							558	64	0.114			535	0.120		
			0.88	0.109	0.8	0.08	446		0.139	3.48		406	0.144	3.17	
钢 丝	I 级	2319	0.92	0.063			2801	241	0.086	3.75		2715	0.089	3.44	
	II 级	3349	0.95	0.058			4069	360	0.083	4.22	3.98	3941	0.091	3.74	3.59
			0.90	0.069			17584	1334	0.076	3.56	3.56	17110	0.078	3.27	3.27