第 18 卷　第 2 期　　西 南 石 油 学 院 学 报　　Vol 18 No. 2
1996 年　5 月　　Journal of Southwestern Petroleum Institute　　May 1996

组合拱式管桥单项可靠指标的建立①

宋文利　　姚安林
(西北石油管道建设指挥部)　　(油建系)

摘要　本文探讨了组合拱式管桥载荷效应组合和结构构件抗力统计分析问题, 建立了组合拱式管桥结构构件的失效准则, 运用一次二阶矩中心点法推导出相应单项可靠指标的计算公式, 这些公式可作为组合拱式管桥可靠性分析与设计的参考。

主题词　管道设计; 组合拱式管桥; 结构力学; 指标; 可靠性
中图法分类号　TE873. 3

前　言

概率极限状态设计法是将概率论与数理统计理论应用于工程结构的设计之中。相对于传统的安全系数法而言, 它具有考虑因素更全面、荷载处理方法更合理等优点。因此该设计方法已在工程界得到推广应用。为了促进这种设计方法在油气储运结构设计方面的应用, 本文借鉴建筑结构设计方面已取得的研究成果, 对油气组合拱式跨越管桥的单项可靠指标进行分析研究。

1　载荷效应组合

组合拱式管桥在其使用期间, 要同时受到竖向恒载(包括组合管拱自重、介质重、保温层及运载管上其它附件的重量等)和三种可变载荷(输送介质内压、风载荷和温度变化)的作用, 因此, 在进行结构分析设计时, 必须研究和考虑这三种可变载荷同时作用而引起的载荷效应组合问题。

一般来说, 多种可变载荷在设计基准期内以及最大值相遇的概率是很小的, 即它们一般不能同时以其设计基准期最大值出现, 因而就存在着如何进行载荷效应组合的问题。载荷效应组合问题是个较复杂的问题, 人们已从不同的角度进行了大量研究, 并提出了各种理论和组合模型[1, 2, 3]。现阶段, 因对各种载荷随机过程的统计规律研究不够充分, 因此, 本文采用国际结构安全度联合委员会(JCSS)推荐的、并被我国《建筑结构设计统一标准》采用的"JC" 载荷组合模型来描述组合拱式管桥的可变载荷效应组合。"JC"载荷组合模型属近似组合模型, 这与采用考虑基本变量概率分布类型的一次二阶矩方法分析结构可靠度是相适应的[4]。

从[5]可知, 组合拱式管桥所受的每种载荷将引起各种效应(如水平推力、轴向力、剪力、

① 1995—09—18 收稿

弯矩等), 且其计算公式颇为复杂, 因此, 为简化起见, 根据载荷效应与载荷呈线性关系的假设, 不直接进行载荷效应组合, 而是按"JC"组合规则进行各种载荷的组合, 计算出每种载荷组合效应的载荷效应, 然后, 根据其中某一种对管桥结构内力状况起主要控制作用的载荷效应, 即计算值为最大时所对应的那种载荷组合作为分析、计算管桥单项可靠指标的最不利载荷效应组合。

按"JC"组合规则, 在 50 年设计基准期内, 组合拱式管桥所受竖向恒载、输送介质内压、风载荷及环境温度变化等载荷有六种不同的组合:

$$① \quad q_v + \max_{t\in[0,T]} t_{uy} + P_y + \omega_y$$

$$② \quad q_v + t_{uy} + \max_{t\in[0,T]} P_y + \omega_y$$

$$③ \quad q_v + t_{uy} + P_y + \max_{t\in[0,T]} \omega_y$$

$$④ \quad q_v + \max_{t\in[0,T]} t_{ly} + P_y + \omega_y$$

$$⑤ \quad q_v + t_{ly} + \max_{t\in[0,T]} P_y + \omega_y$$

$$⑥ \quad q_v + t_{ly} + P_y + \max_{t\in[0,T]} \omega_y$$

上述式中

q_v —组合拱式管桥所受竖向恒载;

$\max\limits_{t\in[0,T]} P_y$、$P_y$ —分别表示年输送介质内压在设计基准期内的最大值和任意时点的年输送介质内压值;

$\max\limits_{t\in[0,T]} t_{uy}$、$t_{uy}$ —分别表示年环境最高气温在设计基准期内的最大值和任意时点的年环境气温值;

$\max\limits_{t\in[0,T]} t_{ly}$、$t_{ly}$ —分别表示年环境最低气温在设计基准期内的最大值和任意时点的年环境气温值;

$\max\limits_{t\in[0,T]} \omega_y$、$\omega_y$ —分别表示年基本风压在设计基准期内的最大值和任意时点的年基本风压。

对于可视为梁式结构的跨越管桥, 载荷效应中的竖向弯矩(M_y)为管桥结构起主要控制作用的效应, 因此, 将上述①~⑥种组合取值代入文献[5]中M_y的计算公式, 可求出相应的六个M_y, 其中使M_y计算值为最大所对应的那种载荷组合即为所寻求的组合拱式管桥结构的最不利载荷组合。

2 结构构件抗力统计分析

所谓结构构件抗力, 是指结构构件截面抵抗载荷效应的能力。文献[4]中指出, 影响结构构件抗力的主要因素是材料性能、几何参数和计算模式精度, 这些影响因素都是随机变量。对于钢结构, 构件抗力 R 可采用下式表达:

$$R = K_M \cdot K_A \cdot K_P \cdot R_K \tag{1}$$

式中, K_M —结构构件材料性能的不定性;

K_A —结构构件几何参数的不定性;

K_P —结构构件计算模式的不定性;

R_K —按规范规定公式计算所得的结构构件抗力的标准值。

从而, 抗力的均值(μ_R)、变异系数(V_R)及标准差(σ_R)分别为[6]:

均值:　　$\mu_R = \mu_{KM} \cdot \mu_{KA} \cdot \mu_{KP} \cdot R_K$

变异系数:　　$V_R = \sqrt{V_{KM}^2 + V_{KA}^2 + V_{KP}^2}$

标准差:　　$\sigma_R = V_R \cdot \mu_R$

式中, μ_{KM}、μ_{KA}、μ_{KP} — 分别为 K_M、K_A、K_P 的均值; V_{KM}、V_{KA}、V_{KP} — 分别为 K_M、K_A、K_P 的变异系数。

在计算组合拱式管桥单项可靠指标时, 除了钢材屈服强度作为构件的抗力之外, 构件的临界力、抗滑移力、抗倾覆力矩以及地基承载力等也属构件的抗力形式, 对这些抗力统计参数的求取, 因缺乏实测统计资料, 故暂未考虑 K_M、K_A、K_P 不定性对混凝土拱支墩抗滑移力、抗倾覆力矩以及地基承载力的影响。对于组合管拱临界水平风载以及腹杆压稳临界压力等抗力的计算, 按钢构件考虑, 计入了 K_M、K_A、K_P 不定性对其抗力的影响。同时, 对所有这些抗力, 不是先将其综合为一个随机变量并假定其分布, 而是将影响抗力不定性的诸变量与载荷效应的各变量按其函数关系直接引入极限状态方程中, 用一次二阶矩理论计算构件的可靠指标[1]。

3　可靠指标 β 计算公式的建立

3.1　随机变量的选定与 β 计算方法的选择

在油气管道跨越结构中存在着大量的随机因素, 如在材料特性、载荷、外部环境、几何尺寸制作等方面均存在随机因素的影响。但是, 由于管桥结构较为复杂, 计算公式繁杂[5], 若将所有影响素都视为随机变量加以考虑, 则会导致可靠指标 β 的计算公式推导过程冗长, 且十分复杂, 甚至难于实现解析结果。因此, 为简化分析计算过程, 本文仅考虑了组合拱式管桥在载荷、材料性能、管子壁厚偏差以及拱支墩处地基土特性等几个方面的随机性, 而其它参数均暂且视为定值考虑, 所以选取如下变量作为计算组合拱式管桥构件可靠指标 β 的相互独立的基本随机变量:

① 管子壁厚: δ_{pf}、δ_s、δ_f

② 基本风压: ω_0

③ 输送介质内压: P

④ 温度变化: t_u、t_l

⑤ 钢材屈服强度: R_{sp}、R_{sj}

⑥ 土壤抗剪切强度指标(内聚力 C_N)及内摩擦角 φ[7]

考虑到影响管桥结构可靠度的因素既多又复杂, 目前对有些因素的研究尚不够深入, 难于准确确定这些随机因素的概率分布类型。因此, 本文根据一次二阶矩中心点法的基本原理[1, 8, 9], 采用中心点法来分析计算组合拱式管桥构件可靠指标 β。

3.1　结构构件的失效准则

根据组合拱式管桥的工作方式和使用条件, 组合拱式管桥的失效形式大致可分为强度不足和失稳两种主要形式。具体地说, 就是指在组合拱式管桥结构中, 运载管、结构管以及腹杆的强度不够; 拱支墩基础地基承载力不够; 腹杆受压失稳; 组合管拱在拱平面内和拱平面外的失稳以及拱支墩抗滑移力、抗倾覆力矩不够而导致的管桥结构的失效等。因此, 建立相应的失效准则分别是:

①运载管的实际计算应力 S_{pi} 大于运载管钢材的屈服强度 R_{sp};
②结构弦管的实际计算应力 S_s 大于结构管钢材的屈服强度 R_{sj};
③腹杆的实际计算应力 S_f 大于结构管钢材的屈服强度 R_{sj};
④腹杆的实际计算压力 N_f 大于其压稳临界压力 N_{fk};
⑤组合管拱所受实际水平风载荷 ω 大于其侧倾失稳的临界水平风载荷 ω_k;
⑥组合管拱在拱平面内计算应力 S_{ya} 大于结构管钢材的屈服强度 R_{sj};
⑦拱支墩实际滑移力 H_G 大于抗滑移力 R_m;
⑧拱支墩实际倾覆力矩 P_A 大于抗倾覆力矩 P_R;
⑨拱支墩基础实际计算压应力 S_G 大于地基的承载力 R_G。

3.3 可靠指标 β 计算公式的推导

3.3.1 将管桥各种荷载产生的效应表达为所选定随机变量的函数形式

为便于 β 计算公式的推导,根据文献[5]中的有关内力计算公式,写出当视运载管壁厚(δ_{pi})、结构弦管壁厚(δ_s)、腹杆壁厚(δ_f)、环境最高、最低气温(t_u、t_l)、输送介质内压(P)以及基本风压(ω)为随机变量时,对应的各种载荷效应的函数表达式。

(1) 竖向载荷 qV 产生的效应:

由[5]中的分析可知,竖向载荷 q_V 可表示为 δ_{pi}、δ_s、δ_f 三个随机变量的函数,其表达式如下:

$$q_v = B_{q11}\delta_{pi}^2 + B_{q2}\delta_s^2 + B_{q3}\delta_f^2 + B_{q12} \tag{2}$$

式中,B_{q11}、B_{q2}、B_{q3}、B_{q12} 均为定值系数,与 δ_{pi}、δ_s、δ_f 无关。

由此可看出,q_v 产生的各种效应也将是 δ_{pi}、δ_s、δ_f 的函数。为表达方便起见,在下面的表达式中,均不写出 q_v 的具体表达式,而直接以 q_v 写入各载荷效应的表达式中。于是,q_v 产生的各种效应可表示为:

①水平推力: $H_{qv} = U_{Hqv} \cdot q_v$
②轴向力: $N_{qv} = U_{Nqv} \cdot q_v$
③剪力: $Q_{qv} = U_{Qqv} \cdot q_v$
④弯矩: $M_{qv} = U_{Mqv} \cdot q_v$

(2) 温度变化产生的效应:

①水平推力: $H_t = U_{1Ht} + U_{2Ht} \cdot t_c$
②轴向力: $N_t = U_{1Nt} + U_{2Nt} \cdot t_c$
③剪力: $Q_t = U_{1Qt} + U_{2Qt} \cdot t_c$
④弯矩: $M_t = U_{1Mt} + U_{2Mt} \cdot t_c$

上式各式中,在环境最高气温下,$t_c = t_u - \bar{t}$;在环境最低气温下,$t_c = t_l - \bar{t}$。

(3) 输送介质内压产生的效应:

①水平推力: $H_p = U_{Hp} \cdot P$
②轴向力: $N_p = U_{Np} \cdot P$
③剪力: $Q_p = U_{Qp} \cdot P$
④弯矩: $M_p = U_{Mp} \cdot P$

(4) 风载荷引起的载荷效应:

①剪力: $Q_\omega = U_{Q\omega} \cdot \omega$

②弯矩:　　$M_{\omega} = U_{M\omega} \cdot \omega$

③扭矩:　　$L_{\omega} = U_{L\omega} \cdot \omega$

上述各式中, ω为风载荷, 由基本风压 ω_0 按[11]中的公式计算而得, 为随机变量。

(5) 各种载荷共同作用下管桥结构产生的总荷载效应:

①水平推力:

$$H = U_{1H} \cdot \delta_{pi}^2 + U_{2H} \cdot \delta_s^2 + U_{3H} \cdot \delta_f^2 + U_{4H} + U_{1Ht} + U_{2Ht} \cdot t_c + U_{Hp} \cdot P \tag{3}$$

②轴向力:

$$N = U_{1N} \cdot \delta_{pi}^2 + U_{2N} \cdot \delta_s^2 + U_{3N} \cdot \delta_f^2 + U_{4N} + U_{1Nt} + U_{2Nt} \cdot t_c + U_{Np} \cdot P \tag{4}$$

③竖向剪力:

$$Q_y = U_{1Q} \cdot \delta_{pi}^2 + U_{2Q} \cdot \delta_s^2 + U_{3Q} \cdot \delta_f^2 + U_{4Q} + U_{1Qt} + U_{2Qt} \cdot t_c + U_{Qp} \cdot P \tag{5}$$

④横向剪力:

$$Q_x = U_{Q\omega} \cdot \omega \tag{6}$$

⑤竖向弯矩:

$$M_y = U_{1M} \cdot \delta_{pi}^2 + U_{2M} \cdot \delta_s^2 + U_{3M} \cdot \delta_f^2 + U_{4M} + U_{1Mt} + U_{2Mt} \cdot t_c + U_{Mp} \cdot P \tag{7}$$

⑥横向弯矩:

$$M_x = U_{M\omega} \cdot \omega \tag{8}$$

⑦扭矩:

$$L_B = U_{L\omega} \cdot \omega \tag{9}$$

(6) 拱支墩所受载荷效应:

①水平推力:

$$H_G = H \tag{10}$$

②竖向力:

$$V_G = U_{1VG} \cdot \delta_{pi}^2 + U_{2VG} \cdot \delta_s^2 + U_{3VG} \cdot \delta_f^2 + U_{VG} + U_{5VG} \cdot t_c + U_{6VG} \cdot P \tag{11}$$

③竖向弯矩:

$$M_{ZG} = M_y \tag{12}$$

④横向弯矩:

$$M_{xG} = U_{M\omega} \cdot \omega \tag{13}$$

⑤拱支墩基础底面与地基土之间的摩擦力:

$$T_G = U_T + U_{1T} \cdot \delta_{pi}^2 + U_{2T} \cdot \delta_s^2 + U_{3T} \cdot \delta_f^2 + U_{4T} + U_{TT} + U_{5T} \cdot t_c + U_{6T} \cdot P \tag{14}$$

需要指出的是, 上述各式中"U"带下标如"U_{Hqv}"、"U_{Nqv}"等均表示与所选随机变量无关的定值系数, 其具体表达式请参见文献[11]。

3.3.2 单项可靠指标 β 计算公式的建立

运用一次二阶矩中心点法, 建立组合拱式管桥在拱顶 ($\varphi = 0$)、拱脚($\varphi = \varphi_0$) 截面处结构构件可靠指标 β 的计算公式, 具体思路是, 写出各结构构件或截面处的效应及抗力的计算表达式, 根据前述强度或稳定性失效准则, 构造相应的极限状态功能函数 ($Z = R - S = f(X)$); 运用中心点法的基本原理, 求极限状态功能函数 Z 关于随机变量 X 在其均值点处的偏导数, 经整理即可得到组合拱式管桥结构构件或截面关于强度、稳定性可靠指标 β 的计算公式。

因篇幅所限, 在这里仅以拱脚运载管强度可靠指标 β_1 计算公式的推导为例, 简述其推

导过程如下。

由材料力学可知，运载管处于平面应力状态，其计算应力 S_{Pi} 根据米赛斯屈服准则的平面形式可得[10]:

$$S_{pi}^2 = S_z^2 + S_t^2 - S_z S_t \tag{15}$$

其中，S_z —轴向应力，计算式为[5]:

$$S_z = -\frac{N}{F_a} + \frac{E \cdot h_1 \cdot M_y}{B_x} + \frac{(D_{pi} - 2\delta_{pi}) \cdot P}{4\delta_{pi}} \tag{16}$$

S_t— 环向应力，计算式为[5]:

$$S_t = \frac{(D_{pi} - 2\delta_{pi}) \cdot P}{2\delta_{pi}} \tag{17}$$

将 S_z、S_t 的计算表达式代入 S_{pi} 的计算式中，经整理后可得:

$$S_{pi} = \{(\frac{E \cdot h_1 \cdot M_y}{B_x} - \frac{N}{F_a})^2 + \frac{3}{16}[(\frac{1}{\alpha_{pi}} - 2)P]^2\}^{1/2} \tag{18}$$

由前面分析可知，N、M_y 均为 δ_{pi}、δ_s、δ_f、t_c、P 等随机变量的函数，因此，S_{pi} 也为这些随机变量的函数。

根据运载管的强度失效准则，可构造出其极限状态功能函数为:

$${}_1 = R_{sp} - S_{pi} = R_{sp} - \{(\frac{E \cdot h_1 \cdot M_y}{B_x} - \frac{N}{F_a})^2 + \frac{3}{16}[(\frac{1}{\alpha_{pi}} - 2)P]^2\}^{1/2} = f_1(R_{sp}, \delta_{pi}, \delta_s, \delta_f, t_c, P) \tag{19}$$

设 R_{sp}、δ_{pi}、δ_s、δ_f、t_c、P、ω 的均值和标准差分别为 μ_{Rs1}、σ_{Rs1}; $\mu_{\delta pi}$、$\sigma_{\delta pi}$; $\mu_{\delta s}$、$\sigma_{\delta s}$; $\mu_{\delta f}$、$\sigma_{\delta f}$; μ_{tc}、σ_{tc}; μ_p、σ_p; μ_ω、σ_ω，则根据一次二阶矩中心点法的基本原理，即可求得运载管的强度可靠指标 β_1 的计算公式:

$$\beta_1 = \mu_{Z1}/\sigma_{Z1} = \frac{f_1(\mu_{Rs1}, \mu_{\delta pi}, \mu_{\delta s}, \mu_{\delta f}, \mu_{tc}, \mu_p)}{\{\sum_{i=1}^{6}[\frac{\partial f_1}{\partial X_i}|_{\mu_{xi}} \cdot \sigma_{xi}]^2\}^{1/2}} \tag{20}$$

式中，$\frac{\partial f_1}{\partial X_i}|_{\mu_{xi}}$ 表示在计算偏导数时，各随机变量均以其均值赋值，σ_x 表示各随机变量的标准差，下同。

$$\frac{\partial f_1}{\partial R_{sp}}|_{\mu_{xi}} = 1$$

$$Y_1 = \frac{E \cdot h_1 \cdot M_y}{B_x} = g_1(\delta_{pi}, \delta_s, \delta_f, t_c, P),$$

则 $$\mu_{y1} = g_1(\mu_{\delta pi}, \mu_{\delta s}, \mu_{\delta f}, \mu_{tc}, \mu_p)$$

$$Y_2 = \frac{N}{F_a} = g_2(\delta_{pi}, \delta_s, \delta_f, t_c, P),$$

则 $$\mu_{y2} = g_2(\mu_{\delta pi}, \mu_{\delta s}, \mu_{\delta f}, \mu_{tc}, \mu_p)$$

$$Y_3 = \frac{3}{16}[(\frac{1}{\alpha_{pi}} - 2)P]^2 = g_3(P)$$

则 $$\mu_{y3} = g_3(\mu_p)$$

于是

$$\frac{\partial f_1}{\partial \delta_{pi}} = \frac{2\mu_{\delta pi}}{\sqrt{(\mu_{y1}-\mu_{y2})^2+\mu_{y3}}}(\mu_{y1}-\mu_{y2})\left(\frac{E.\ h_1}{B_x}U_{1M}-\frac{1}{F_a}U_{1N}\right)$$

$$\frac{\partial f_1}{\partial \delta_s} = \frac{2\mu_{\delta s}}{\sqrt{(\mu_{y1}-\mu_{y2})^2+\mu_{y3}}}(\mu_{y1}-\mu_{y2})\left(\frac{E.\ h_1}{B_x}U_{2M}-\frac{1}{F_a}U_{2N}\right)$$

$$\frac{\partial f_1}{\partial \delta_f} = \frac{2\mu_{\delta f}}{\sqrt{(\mu_{y1}-\mu_{y2})^2+\mu_{y3}}}(\mu_{y1}-\mu_{y2})\left(\frac{E.\ h_1}{B_x}U_{3M}-\frac{1}{F_a}U_{3N}\right)$$

$$\frac{\partial f_1}{\partial t_c} = \frac{\mu_{y1}-\mu_{y2}}{\sqrt{(\mu_{y1}-\mu_{y2})^2+\mu_{y3}}}\left(\frac{E.\ h_1}{B_x}U_{2Mt}-\frac{1}{F_a}U_{2Nt}\right)$$

$$\frac{\partial f_1}{\partial P} = \frac{1}{2\sqrt{(\mu_{y1}-\mu_{y2})^2+\mu_{y3}}}\left[2(\mu_{y1}-\mu_{y2})\left(\frac{E.\ h_1}{B_x}U_{MP}-\frac{1}{F_a}U_{NP}\right)+\frac{3}{8}\left[\left(\frac{1}{\alpha_{pi}}-2\right)^2\cdot \mu_p\right]\right.$$

上述各式中, t_c、P 的均值和标准差请参见文献[11]; 壁厚 (δ_{pi}、δ_s、δ_f) 的均值和标准差根据有关标准规定的管子壁厚制作偏差, 采用下述方法估算壁厚的统计参数[2]:

设壁厚的标准值(公称值)为 δ_k, 规定的允许制作正负偏差为 $\triangle_b^+$、$\triangle_b^-$, 其产品合格率为 95%, 且壁厚尺寸服从正态分布, 则

均值:
$$\mu_b = \delta_k + \frac{\triangle_b^+ - \triangle_b^-}{2} \tag{21}$$

由正态分布函数性质可知, 当合格率为 95% 时, 有

$$\delta_{min} = \mu_b - 1.645\sigma_b$$

因: $\mu_b - \delta_{min} = \dfrac{\triangle_b^+ + \triangle_b^-}{2}$　　于是, 壁厚的标准差为:

$$\sigma_b = \frac{\mu_b - \delta_{min}}{1.645} = \frac{\triangle_b^+ + \triangle_b^-}{3.290} \tag{22}$$

与上述推导过程类似, 可推得与前述失效准则相应的其它可靠指标 β_2～β_9 的计算公式分别如下:

①拱脚结构弦管强度可靠指标 β_2:

极限状态功能函数为:

$$Z_2 = R_{sj} - \left[-\frac{N}{F_a} - \frac{E\cdot(h-h_1)\cdot M_y}{B_x} \pm \frac{a\cdot E\cdot M_x}{2B_y}\right] = f_2(R_{sj}、\delta_{pi}、\delta_s、\delta_f、t_c、P、\omega) \tag{23}$$

(a). 当上式中"±"取"+"时:

$$\beta_2 = \frac{\mu_{Z2}^+}{\sigma_{Z2}^+} = \frac{f_2^+(\mu_{Rs2}, \mu_{\delta pi}, \mu_{\delta s}, \mu_{\delta f}, \mu_{tc}, \mu_p, \mu_\omega)}{\left\{\sum_{i=1}^{7}\left[\frac{\partial f_2^+}{\partial X_i}\Big|_{\mu_{xi}}\cdot\sigma_{xi}\right]^2\right\}^{1/2}} \tag{24—a}$$

(b) 当上式中"±"取"-"时:

$$\beta_2 = \frac{\mu_{Z2}^-}{\sigma_{Z2}^-} = \frac{f_2^-(\mu_{Rs2}, \mu_{\delta pi}, \mu_{\delta s}, \mu_{\delta f}, \mu_{tc}, \mu_p, \mu_\omega)}{\left\{\sum_{i=1}^{7}\left[\frac{\partial f_2^-}{\partial X_i}\Big|_{\mu_{xi}}\cdot\sigma_{xi}\right]^2\right\}^{1/2}} \tag{24—b}$$

②拱脚结构腹杆强度可靠指标 β_3:

极限状态功能函数为:

$$Z_3 = R_{sj} - S_f = f_3(R_{sj}、\delta_{pi}、\delta_s、\delta_f、t_c、P、\omega) \tag{25}$$

(a) 当 $S_f = |S_{f1}| = \left|\frac{1}{F_f\sin\theta}\left[\frac{h_1}{h}|Q_x| + \frac{1}{h}|L_B|\right]\right|$ 时:

$$\beta_3 = \frac{f_3(\mu_{Rs2},\mu_\omega)}{\left[\left(\frac{\partial f_3}{\partial R_{sj}}\Big|_{\mu_{Rs2}}\cdot\sigma_{Rs2}\right)^2 + \left(\frac{\partial f_3}{\partial\omega}\Big|_{\mu_\omega}\cdot\sigma_\omega\right)^2\right]^{1/2}} \tag{26—a}$$

(b) 当 $S_f = |S_{f2}| = \left|\frac{1}{2F_f\sin\theta}\left[\frac{h-h_1}{h}|Q_x| + \frac{1}{\sqrt{3}}|Q_y| - \frac{1}{h}|L_B|\right]\right|$ 时:

$$\beta_3 = \frac{\mu_{Z3}}{\sigma_{Z3}} = \frac{\left\{R_{sj} - \frac{1}{2F_f\sin\theta}\left[\frac{h-h_1}{h}|Q_x| + \frac{1}{\sqrt{3}}|Q_y| - \frac{1}{h}|L_B|\right]\right\}_\mu}{\sum_{i=1}^{7}\left[\frac{\partial f_3}{\partial X_i}\Big|_{\mu_{xi}}\cdot\sigma_{xi}\right]^2\}^{1/2}} \tag{26—b}$$

(c) 当 $S_f = |S_{f3}| = \left|\frac{1}{2F_f\sin\theta}\left[-\frac{h-h_1}{h}|Q_x| + \frac{1}{\sqrt{3}}|Q_y| + \frac{1}{h}|L_B|\right]\right|$ 时:

$$\beta_3 = \frac{\mu_{Z3}}{\sigma_{Z3}} = \frac{\left\{R_{sj} - \frac{1}{2F_f\sin\theta}\left[-\frac{h-h_1}{h}|Q_x| + \frac{1}{\sqrt{3}}|Q_y| + \frac{1}{h}|L_B|\right]\right\}_\mu}{\sum_{i=1}^{7}\left[\frac{\partial f_3}{\partial X_i}\Big|_{\mu_{xi}}\cdot\sigma_{xi}\right]^2\}^{1/2}} \tag{26—c}$$

③拱脚结构腹杆压稳可靠指标 β_4:

极限状态功能函数为:

$$Z_4 = N_{fk} - N_f = f_4(N_{fk}、\delta_{pi}、\delta_s、\delta_f、t_c、P、\omega) \tag{27}$$

(a) 当 $N_f = |F_f\cdot S_{f1}|$ 时:

$$\beta_4 = \frac{\mu_{Z4}}{\sigma_{Z4}} = \frac{f_4(\mu_{Nfk},\mu_\omega)}{\left[\left(\frac{\partial f_4}{\partial N_{fk}}\Big|_{\mu_{Nfk}}\cdot\sigma_{Nfk}\right)^2 + \left(\frac{\partial f_4}{\partial\omega}\Big|_{\mu_\omega}\cdot\sigma_\omega\right)^2\right]^{1/2}} \tag{28—a}$$

(b) 当 $N_f = |F_f\cdot S_{f2}|$ 时:

$$\beta_4 = \frac{\mu_{Z4}}{\sigma_{Z4}} = \frac{f_4(\mu_{Nfk},\mu_{\delta pi},\mu_{\delta s},\mu_{\delta f},\mu_{tc},\mu_p,\mu_\omega)}{\left\{\sum_{i=1}^{7}\left[\frac{\partial f_4}{\partial X_i}\Big|_{x_i}\cdot\sigma_{xi}\right]^2\right\}^{1/2}} \tag{28—b}$$

(c) 当 $N_f = |F_f\cdot S_{f3}|$ 时:

$$\beta_4 = \frac{\mu_{Z4}}{\sigma_{Z4}} = \frac{f_4(\mu_{Nfk},\mu_{\delta pi},\mu_{\delta s},\mu_{\delta f},\mu_{tc},\mu_p,\mu_\omega)}{\left\{\sum_{i=1}^{7}\left[\frac{\partial f_4}{\partial X_i}\Big|_{x_i}\cdot\sigma_{xi}\right]^2\right\}^{1/2}} \tag{28—c}$$

④拱顶组合管拱截面面外稳定性可靠指标 β_5:

极限状态功能函数为:

$$Z_5 = K_\omega\omega_k - \omega = f_5(K_\omega、R_{sj}、\delta_{pi}、\delta_s、\delta_f、t_c、P、\omega) \tag{29}$$

β_5 的计算公式为:

$$\beta_5 = \frac{\mu_{Z5}}{\sigma_{Z5}} = \frac{f_5(\mu_{k\omega},\mu_{RS2},\mu_{\delta pi},\mu_{\delta s},\mu_{\delta f},\mu_{tc},\mu_p,\mu_\omega)}{\left\{\sum_{i=1}^{8}\left[\frac{\partial f_5}{\partial X_i}\Big|_{\mu_{xi}}\cdot\sigma_{xi}\right]^2\right\}^{1/2}} \tag{30}$$

⑤拱顶组合管拱截面面内强度可靠指标 β_6:

极限状态功能函数为:

$$Z_6 = R_{sj} - S_{ya} = f_6(R_{sj}、\delta_{pi}、\delta_s、\delta_f、t_c、P) \tag{31}$$

β_6 的计算公式为:

$$\beta_6 = \frac{\mu_{Z6}}{\sigma_{Z6}} = \frac{f_6(\mu_{RS2}、\mu_{\delta_p i}, \mu_{\delta_s}, \mu_{\delta_f}, \mu_{tc}, \mu_p)}{\{\sum_{i=1}^{6}[\frac{\partial f_6}{\partial X_i}|_{\mu_{xi}} \cdot \sigma_{xi}]^2\}^{1/2}} \tag{32}$$

⑥拱支墩抗滑移稳定性可靠指标 β_7:

极限状态功能函数为:

$$Z_7 = R_m - H_G = f_7(\varphi、\delta_{pi}、\delta_s、\delta_f、t_c、P) \tag{33}$$

β_7 的计算公式为:

$$\beta_7 = \frac{\mu_{Z7}}{\sigma_{Z7}} = \frac{f_7(\mu_\varphi、\mu_{\delta_p i}, \mu_{\delta_s}, \mu_{\delta_f}, \mu_{tc}, \mu_p)}{\{\sum_{i=1}^{6}[\frac{\partial f_7}{\partial X_i}|_{\mu_{xi}} \cdot \sigma_{xi}]^2\}^{1/2}} \tag{34}$$

⑦拱支墩抗倾覆稳定性可靠指标 β_8:

极限状态功能函数为:

$$Z_8 = P_R - P_A = f_8(\varphi、\delta_{pi}、\delta_s、\delta_f、t_c、P) \tag{35}$$

β_8 的计算公式为:

$$\beta_8 = \frac{\mu_{Z8}}{\sigma_{Z8}} = \frac{f_8(\mu_\varphi、\mu_{\delta_p i}, \mu_{\delta_s}, \mu_{\delta_f}, \mu_{tc}, \mu_p)}{\{\sum_{i=1}^{6}[\frac{\partial f_8}{\partial X_i}|_{\mu_{xi}} \cdot \sigma_{xi}]^2\}^{1/2}} \tag{36}$$

⑧拱支墩地基承载力强度可靠指标 β_9:

极限状态功能函数为:

$$Z_9 = R_G - S_G = f_9(\varphi、C_N、\delta_{pi}、\delta_s、\delta_f、t_c、P、\omega) \tag{37}$$

β_9 的计算公式为:

$$\beta_9 = \frac{\mu_{Z9}}{\sigma_{Z9}} = \frac{f_9(\mu_\varphi、\mu_{CN}、\mu_{\delta_p i}, \mu_{\delta_s}, \mu_{\delta_f}, \mu_{tc}, \mu_p、\mu_\omega)}{\{\sum_{i=1}^{8}[\frac{\partial f_9}{\partial X_i}|_{\mu_{xi}} \cdot \sigma_{xi}]^2\}^{1/2}} \tag{38}$$

式(24)、(26)、(28)、(30)、(32)、(34)、(36)、(38)中各偏导数的计算表达式详见文献[11]。

结 束 语

本文在已有关于组合拱式管桥研究成果的基础上[5, 12], 探讨了组合拱式管桥控制截面可靠指标计算问题, 根据一次二阶矩理论, 采用中心点法, 推导和建立了组合拱式管桥控制截面强度及稳定性单项可靠指标的计算公式, 该研究成果为今后进一步探讨关于组合拱式管桥的可靠性分析与设计问题奠定了基础。

参 考 文 献

1 邹天一. 桥梁结构可靠度. 人民交通出版社, 1991. 6

2 黄兴棣. 工程结构可靠性设计. 人民交通出版社, 1989. 1

3 林忠民. 工程结构可靠性设计与估计. 人民交通出版社, 1990. 12

4 中国建筑科学研究院主编. 建筑结构统一标准(GBJ68—84). 1984

5 宋文利, 姚安林. 组合拱式管桥计算机模拟设计. 天然气与石油, 1995, 13(4)

6 赵国藩. 结构可靠度分析的抗力统计模式. 土木工程学报, 1985, 18(1)

7 G. N. Smith 著. 曹炽康, 张惠英等译. 土木工程实用概率和统计. 同济大学出版社, 1989. 7

8 李继华, 林忠民, 李明顺, 马坤贞等. 建筑结构概率极限状态设计. 中国建筑工业出版社, 1990. 10

9 Shu-Ho Dai, Ming-O Wang. Reliability Analysis in Engineering Applications. Published by Van Nostrand Reinhold, 115 Fifth Anvenue, New York, New York 10003, 1992

10 李有兴, 肖芳淳. 热油管道可靠性因子设计法. 油田地面工程, 1993, 12(5)

11 宋文利. 组合拱式管桥可靠性设计. 西南石油学院硕士论文. 1994. 6

Set-up of Itemized Reliability Indices for Combined-Arched Pipe Bridge

Song Wenli (*NW Command of Oil Pipeline Construction*)

Yaao Anlin (*SW Petroleum Institute*)

Abstract

This paper discusses the problems on the loading response combination of combined-arched pipe bridge and the statistical analysis of the component resistance of the structure, sets up the failure criteria for the components of the structure, and derives the formulas to be used for calculating the itemized reliability indices of the pipe bridge by using the centre-point method of the first-order second-moment theory. They formulas can be used as the basis of reliability analysis and the design of combined-arched pipe bridge.

Key Words: Pipe line design; Combined-arched pipe bridge; Structural mechanics; Index; Reliability