

大跨钢管混凝土拱桥设计技术规程（拟改为钢管混凝土拱桥设计技术规程）

1 范围

本文件界定了钢管混凝土拱桥设计的术语和定义及符号，规定了钢管混凝土拱桥设计的基本规定、材料、总体设计与构造、设计施工要求、结构设计、结构验算等技术要求。

本文件适用于广西壮族自治区行政区域内公路和市政单肢构件采用圆形截面、哑铃形截面的钢管混凝土拱桥设计。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 700 碳素结构钢
GB/T 714 桥梁用结构钢
GB/T 1591 低合金高强度结构钢
GB/T 5224 预应力混凝土用钢绞线
GB/T 17101 桥梁缆索用热镀锌钢丝
GB/T 30790.1 色漆和清漆 防护涂料体系对钢结构的防腐保护 第1部分：总则
GB 50010 混凝土结构设计规范
GB 50017 钢结构设计标准
GB/T 50107 混凝土强度检验评定标准
GB 50661 钢结构焊接规范
GB 50923 钢管混凝土拱桥技术规范
GB/T 51446 钢管混凝土混合结构技术标准
GB 55002 建筑和市政工程抗震通用规范
GB 55011 城市道路交通工程项目规范
CJJ 11 城市桥梁设计规范
CJJ 166 城市桥梁抗震设计规范
JT/T 329 公路桥梁预应力钢绞线用锚具、夹具和连接器
JT/T 722 公路桥梁钢结构防腐涂装技术条件
JTG D60 公路桥涵设计通用规范
JTG D64 公路钢结构桥梁设计规范
JTG 3362 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范
JTG 3363 公路桥涵地基与基础设计规范
JTG/T D65-06 公路钢管混凝土拱桥设计规范
JTG/T 2231-01 公路桥梁抗震设计规范
JTG/T 3360-01 公路桥梁抗风设计规范
DB45/T 2279 钢管混凝土拱桥管内混凝土施工技术规程

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

钢管混凝土拱桥 concrete-filled steel tubular (CFST) arch bridge

主拱为钢管混凝土构件的拱桥。

3.2

构件承载力 component bearing capacity

构件在达到强度失效或稳定失效时的承载能力。

3.3

主拱稳定极限承载力 stability bearing capacity of arch

主拱达到体系非线性失稳时的承载能力。

3.4

弹性模量缩减法 elastic modulus reduction method (EMRM)

通过对高承载构件弹性模量缩减识别结构破坏模式,采用弹性迭代求解结构体系承载力的计算方法。

3.5

单元承载比 element bearing ratio

多内力组合下单元广义内力与广义抗力比值的最大值。

3.6

构件承载比 component bearing ratio

构件上所有单元的单元承载比最大值。

3.7

承载比均匀度 uniformity of bearing ratio

构件承载比均值与最小值之和,与构件承载比均值与最大值之和的比值。

3.8

均匀承载准则 uniform bearing ratio criterion

承载比均匀度满足迭代收敛容差的结构优化设计准则。

3.9

两层面承载力 two-level bearing capacity

结构在构件和体系两个层面的承载能力。

3.10

两层面承载力设计 design of two-level bearing capacity

同时满足结构构件和体系两个层面承载力需求的设计。

3.11

两层面优化设计 two-level optimal design

满足两层面承载力设计要求,并采用均匀承载准则开展设计方案优化迭代的设计方法。

3.12

构件截面塑性发展系数 plastic development coefficient of components

构件截面进入塑性的塑性弯矩与弹性极限弯矩的比值。

3.13

钢管初应力 initial stress of steel tube

钢管混凝土构件中核心混凝土与钢管形成组合截面前钢管的应力。

4 符号

下列符号适用于本文件。

$\bar{b}_k$: 构件承载比平均值;

$\bar{b}_k^{\max}$ 、 $\bar{b}_k^{\min}$: 构件承载比最大值、最小值;

b_k^c : 构件 c 的承载比;

d_0 、 d_1 : 优化设计迭代前、后的构件承载比均匀度;

D_{Ad} : 主拱竖向挠度幅值;

D_{Ad1} 、 D_{Ad2} : 主拱竖向正向挠度、负向挠度幅值;

D_{Bd} : 桥面梁(板)竖向挠度幅值;

D_1 、 T_1 : 截面调整后的钢管外径、壁厚;

N_d 、 M_d : 构件轴向力、弯矩设计值;

M_{dy} 、 M_{dz} : 构件绕 y 轴、 z 轴的弯矩设计值;

V_d : 构件剪力设计值;

σ_0 : 钢管初应力;

f_{ck} 、 f_{cd} : 混凝土轴心抗压强度标准值、设计值;

f_{pk} : 吊索和系杆索抗拉强度标准值;

f_{sck} 、 f_{sc} : 钢管混凝土组合轴心抗压强度的标准值、设计值;

f_y 、 f_{sd} : 钢管的屈服强度、抗拉强度设计值;

E_{sc} : 钢管混凝土组合弹性轴压模量;

E_s : 哑铃形截面中连接钢腹板的弹性模量;

E_{sc}^d : 哑铃形截面的组合弹性轴压模量;

N_{cr} : 欧拉临界力;

N_{Rd} 、 M_{Rd} : 构件抗压强度、抗弯强度设计值;

α : 钢管混凝土材料的线膨胀系数;

τ_{sc} : 钢管混凝土组合抗剪强度设计值;

d_s : 球冠形脱空的最大高度;

i : 单肢构件截面回转半径;

l_1 : 构件计算长度;

r_i 、 r_o : 钢管内径、外径;

x_0 、 x_1 : 调整前、后的构件截面参数;

A_c : 钢管混凝土的管内混凝土截面积;

A_s : 钢管混凝土的钢管截面积;

A_{sc} : 钢管混凝土构件截面积;

A_{sw} : 哑铃形截面中连接钢腹板面积;

A_{sc}^d : 哑铃形截面组合受力面积;

$A_{sc,0}$ 、 $A_{sc,1}$: 调整前、后的构件截面积;

T : 钢管壁厚;

L : 主拱的计算跨径;

W_{sc} 、 I_{sc} : 钢管混凝土构件截面抗弯抵抗矩、惯性矩;

K_d : 管内混凝土脱空折减系数;

K_p : 钢管初应力折减系数;

K_1 : 构件承载力设计时的构件计算安全系数;

K_M : 稳定极限承载力设计时的构件计算安全系数;

$[K^s]$: 主拱非线性稳定安全系数限值;

$[K_0]$: 构件安全系数限值;

K_{ES} : 主拱弹性整体稳定系数;

α_f : 钢材标准值与混凝土标准值之比;

α_0 : 优化设计的构件截面参数调整系数;
 α_M : 稳定极限承载力设计时的构件截面参数调整系数;
 α_s : 钢管混凝土截面含钢率;
 γ : 结构重要性系数;
 γ_1 : 构件承载力设计时的强度比指数;
 γ_m : 构件截面塑性发展系数;
 γ_M : 稳定极限承载力设计时的构件强度比指数;
 γ_S : 吊索和系杆索承载力计算的综合系数;
 γ_V : 截面抗剪修正系数;
 ε_d : 优化设计的迭代收敛容差;
 λ : 构件的长细比;
 λ_n : 圆钢管构件的相对长细比;
 λ_p 、 λ_o : 钢管混凝土构件弹性失稳的界限长细比、弹塑性失稳的界限长细比;
 ξ_k 、 ξ_d : 钢管混凝土约束效应系数的标准值、设计值;
 φ : 稳定系数;
 χ_s : 球冠形脱空的脱空率;
 ω : 钢管初应力度;
 c 、 n : 构件编号和总数;
 k : 迭代步数;
 t : 检测时间。

5 基本规定

5.1 一般规定

5.1.1 钢管混凝土拱桥设计包括下列内容:

- 总体设计与构造应包括桥型、桥跨方案、上部及下部结构构造尺寸和材料选用、附属结构布置、设计施工要求;
- 结构设计应包括构件承载力设计和主拱稳定极限承载力设计,宜进行主拱两层面承载力优化;
- 结构验算,应包括组合受压构件承载力、节点承载力、疲劳承载力、主拱弹性稳定性、抗风和抗震承载力等承载能力极限状态验算,并应包括主拱和桥面竖向挠度、桥梁动力特性等正常使用极限状态验算。

5.1.2 钢管混凝土拱桥结构设计应计入钢管初应力和管内混凝土脱空的影响。

5.1.3 钢管混凝土拱桥主体结构设计使用年限应为 100 年,吊索、系杆索的设计使用年限应为 20 年。钢结构防腐涂层体系保护年限应为 30 年。吊索、系杆索锚固设计必须具有查检查、可更换的构造和措施。

5.2 作用和作用组合

5.2.1 作用分类、代表值和作用组合应符合 JTG D60、JTG/T D65-06 和 CJJ 11 的有关规定。

5.2.2 地震作用和作用组合应符合 GB 55011、GB 55002、JTG/T 2231-01 和 CJJ 166 的有关规定。

5.2.3 风荷载作用和作用组合应符合 JTG D60 和 JTG/T 3360-01 的有关规定。

5.3 结构分析

5.3.1 钢管混凝土拱桥结构分析方法符合下列规定:

- 构件内力分析应采用弹性内力分析方法;

- b) 主拱稳定极限承载力计算可采用附录 A 的工程结构承载力分析的弹性模量缩减法，材料本构关系可采用附录 B 的圆形截面钢管混凝土材料本构模型；
 - c) 主拱两层面承载力优化可采用附录 C 的工程结构两层面承载力设计与优化方法。
- 5.3.2 结构设计和结构验算宜采用空间有限元计算方法。

6 材料

6.1 钢材

- 6.1.1 钢管混凝土拱桥钢材应根据结构重要性、荷载特征、应力状态、连接方式、环境条件等因素确定强度和质量等级，宜采用 Q355、Q390、Q420、Q460 钢。
- 6.1.2 钢材质量等级应根据使用环境温度选用 B 级或 B 级以上，需验算疲劳的焊接结构用钢材应符合 GB 50017 的有关规定。钢材质量应符合 GB/T 700、GB/T 1591、GB/T 714 的有关规定。
- 6.1.3 当钢材有防止层状撕裂而采用 Z 向钢时，其材质应符合 GB/T 5313 的有关规定。
- 6.1.4 钢管宜采用直缝焊接钢管，焊缝应采用全熔透对接焊缝并应符合 GB 50661 中关于一级焊缝质量检验标准。当钢管径厚比不满足卷制要求时，钢管也可采用无缝钢管。
- 6.1.5 钢材的强度设计值和其他物理力学性能指标，应符合 GB 50017、GB/T 700 和 GB/T 1591、GB/T 714 的有关规定。
- 6.1.6 钢结构构件截面应为双轴对称截面或单轴对称截面，截面板件宽厚比等级应符合现行国家标准 GB 50017 中 S1 级、S2 级的要求。

6.2 混凝土

- 6.2.1 钢管混凝土拱桥的混凝土质量应符合 GB 50010 和 GB/T 50107 的有关规定。
- 6.2.2 钢管内混凝土强度设计值和其他物理力学性能指标，应按 GB 50010 的有关规定执行。
- 6.2.3 钢管内混凝土应采用自密实补偿收缩混凝土，其体积稳定性指标要求应符合 DB45/T 2279 的有关规定。

6.3 钢管混凝土

- 6.3.1 钢管与管内混凝土的匹配关系宜符合表 1 的规定：

表1 钢管与管内混凝土的匹配关系

钢材牌号	Q355	Q390、Q420、Q460
混凝土强度等级	C40-C80	C50-C80

- 6.3.2 钢管混凝土构件外径、壁厚、径厚比、含钢率、约束效应系数的构造要求，应符合 JTG/T D65-06 的有关规定，并应符合下列规定：

- a) 含钢率应按下式计算，取值宜为 0.04~0.20：

$$\alpha_s = \frac{A_s}{A_c} \dots\dots\dots (1)$$

- 式中：
- α_s ——钢管混凝土截面含钢率；
 - A_s ——钢管混凝土的钢管截面积（m²）；
 - A_c ——钢管混凝土管内混凝土截面积（m²）。
- b) 约束效应系数应按下式计算， ξ_k 取值不宜小于 0.6：

$$\xi_k = \frac{A_s f_y}{A_c f_{ck}}, \quad \xi_d = \frac{A_s f_{sd}}{A_c f_{cd}} \dots\dots\dots (2)$$

式中:

ξ_k ——钢管混凝土约束效应系数标准值;

ξ_d ——钢管混凝土约束效应系数设计值;

f_y ——钢管的屈服强度设计值 (MPa);

f_{sd} ——钢管的抗拉强度设计值 (MPa);

f_{ck} ——钢管内混凝土轴心抗压强度标准值 (MPa);

f_{cd} ——钢管内混凝土轴心抗压强度设计值 (MPa)。

6.3.3 钢管混凝土组合轴心抗压强度应按下列公式计算:

$$f_{sck} = \begin{cases} (1.14 + 1.02\xi_k)f_{ck}, & T \leq 16 \\ 0.96(1.14 + 1.02\xi_k)f_{ck}, & T > 16 \end{cases} \dots\dots\dots (3)$$

$$f_{sc} = \begin{cases} (1.14 + 1.02\xi_d)f_{cd}, & T \leq 16 \\ 0.96(1.14 + 1.02\xi_d)f_{cd}, & T > 16 \end{cases} \dots\dots\dots (4)$$

式中:

f_{sck} ——钢管混凝土组合轴心抗压强度的标准值 (MPa);

f_{sc} ——钢管混凝土组合轴心抗压强度的设计值 (MPa);

T ——钢管壁厚 (mm)。

6.3.4 钢管混凝土弹性模量应采用组合弹性轴压模量, 并应符合下列规定:

a) 圆形截面的组合弹性轴压模量应按下列公式计算:

$$E_{sc} = \frac{\left(\frac{0.192f_y}{235} + 0.488\right)f_{sck} \times 10^6}{3.25f_y} \dots\dots\dots (5)$$

式中:

E_{sc} ——钢管混凝土组合弹性轴压模量 (MPa)。

b) 哑铃形截面 (见图 1) 的组合弹性轴压模量应按下列公式计算:

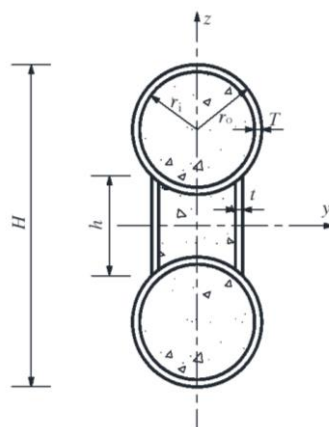


图1 哑铃形截面的几何参数

$$E_{sc}^d = \frac{2E_{sc}A_{sc} + E_s A_{sw}}{A_{sc}^d} \dots\dots\dots (6)$$

式中:

E_{sc}^d ——哑铃形截面的组合弹性轴压模量 (MPa);

E_s ——哑铃形截面中连接钢腹板的弹性模量 (MPa);

A_{sc}^d ——哑铃形截面组合受力面积 (m^2)， $A_{sc}^d = 2A_{sc} + A_{sw}$ ；

A_{sc} ——单个圆钢管混凝土构件截面积 (m^2)， $A_{sc} = \pi r_o^2$ ；

A_{sw} ——哑铃形截面中连接钢腹板面积 (m^2)， $A_{sw} = 2th$ ；

r_o ——构件截面外径 (m)；

t ——连接钢腹板的厚度 (m)；

h ——连接钢腹板的高度 (m)；

H ——哑铃形截面的高度 (m)。

6.3.5 钢管混凝土组合抗剪强度应按下列式计算：

$$\tau_{sc} = \begin{cases} (0.422 + 0.313\alpha_s^{2.33})\xi_d^{0.134}f_{sc}, & T \leq 16 \\ 0.96(0.422 + 0.313\alpha_s^{2.33})\xi_d^{0.134}f_{sc}, & T > 16 \end{cases} \quad (7)$$

式中：

τ_{sc} ——钢管混凝土组合抗剪强度设计值 (MPa)。

6.3.6 钢管混凝土材料的线膨胀系数 α 应取 1.2×10^{-5} 。

6.4 连接材料

6.4.1 焊接材料和连接紧固件的选用应符合 GB 50017 的有关规定。

6.4.2 焊缝和连接紧固件的强度指标应符合 GB 50017 的有关规定。

6.5 其他材料

6.5.1 吊索和系杆索材料可选用高强钢丝和钢绞线，并应符合 GB 50923、GB/T 17101 和 GB/T 5224 的有关规定。

6.5.2 吊索和系杆索的锚具及连接件的钢材应选用碳素结构钢或合金结构钢，性能要求应符合 JT/T 329 的有关规定。

6.5.3 防腐材料应符合 GB/T 30790.1 的有关规定，防火涂料应符合 GB/T 14907 的有关规定。

7 总体设计与构造要求

7.1.1 钢管混凝土拱桥总体设计与构造应符合 JTG/T D65-06 的有关规定。

7.1.2 桥梁主跨跨径选择应综合考虑地形、地质、水文、通航、行洪、防撞、施工等因素。

7.1.3 提篮式主拱内倾角宜为 $5^\circ \sim 10^\circ$ 。

7.1.4 拱肋主弦管宜采用等外径管，并可根据受力情况在各节段采用不同壁厚，壁厚种类不宜大于 4 种。当采用变径管时，管径类型不宜大于 3 种。

7.1.5 拱肋间应设置横撑。横撑形式可采用一字式、K 式、X 式、米字式以及组合横撑形式。横撑构造应与拱肋截面相适应，截面可采用圆管、哑铃型或桁式。横撑布置应满足建筑限界、结构稳定性要求，并兼顾景观效果及行车视野需要。

7.1.6 拱上立柱与主弦管之间传力应直接、可靠，立柱宜采用钢管、钢管混凝土或钢箱构件，应避免现场高空焊接立柱与拱肋间的焊缝，矮立柱可与拱肋焊接后整体安装，高立柱宜设置短接头与拱肋焊接后整体安装。

7.1.7 大跨及超大跨径应考虑吊索振动及其与主梁内共振问题。

7.1.8 系杆拱桥的系杆布置宜采用永临结合方案。

7.1.9 中承式和下承式拱桥桥面系应满足单根横梁两端吊杆失效后不落梁。

7.1.10 单跨桥面系横梁内布置四车道及四车道以上时，桥面系横梁加工应设置横向预拱度。

7.1.11 格子梁桥面体系宜加大端梁刚度，端横梁可采用填充混凝土的箱型截面。

7.1.12 上承式拱桥桥面系计算时，应计入主拱、立柱对桥面系局部承载能力和变形的影响，采用预制

T 梁、小箱梁的装配式桥面系应进行专项验算。

7.1.13 中承式和下承式拱桥交界墩、立柱宜采用双支座体系。

7.1.14 桥梁应针对拱肋、吊杆、主梁、支座等设置检修通道，应达到可通、可修、可更换要求。

7.1.15 支座布置宜采用少支座原则，支座不应脱空。活动支座处应设置可靠限位，并应满足温度变化、抗风、抗震及长期运营等要求。

7.1.16 钢管混凝土拱桥的钢构件，应考虑桥址处的大气腐蚀环境、构件材质、涂装部位、工艺要求、涂层体系保护年限、施工和养护条件等，按 JT/T 722 的相关规定进行防腐涂装，并对拱肋环缝外表面、高强螺栓等部位进行重点防护。

7.1.17 宜采用除尘处理系统、除湿系统、防爆照明系统等机械化设备，保证涂料涂装环境温度、湿度及工艺要求符合 JT/T 722 的相关规定。

8 设计施工要求

8.1.1 设计施工方案计算应符合 JTG/T D65-06 的有关规定。

8.1.2 钢管混凝土拱桥施工方法可采用缆索吊装斜拉扣挂法、支架法、转体法、整体提升法，应根据设计要求和现场实际施工条件综合选择。

8.1.3 采用斜拉扣挂施工方法时，主拱扣点宜采用锚拉板形式。

8.1.4 管内混凝土宜采用真空辅助泵送顶升压注法。

8.1.5 钢管混凝土拱桥施工应按施工方案进行，宜采用两岸对称施工原则。

8.1.6 设计施工方案计算应为结构设计提供钢管混凝土构件的初应力，并应控制钢管初应力在 $0.65f_{sd}$ 以内。

8.1.7 设计施工方案应对拱肋安装完成并解除所有临时支承后的拱肋轴线偏位、拱圈高程、对称点高差、相邻拱肋高差和拱肋接缝错边等提出检测和允许偏差要求。

8.1.8 设计施工方案应对管内混凝土的灌注密实性提出质量和检测要求。

9 结构设计

9.1 一般规定

9.1.1 钢管混凝土拱桥应根据成桥状态下最不利作用组合进行结构设计。

9.1.2 钢管混凝土拱桥应进行构件和主拱非线性稳定两层面承载力设计，并宜进行主拱两层面承载力优化。

9.1.3 主拱稳定极限承载力计算可采用附录 A 工程结构承载力分析的弹性模量缩减法（EMRM），计算流程见图 2。

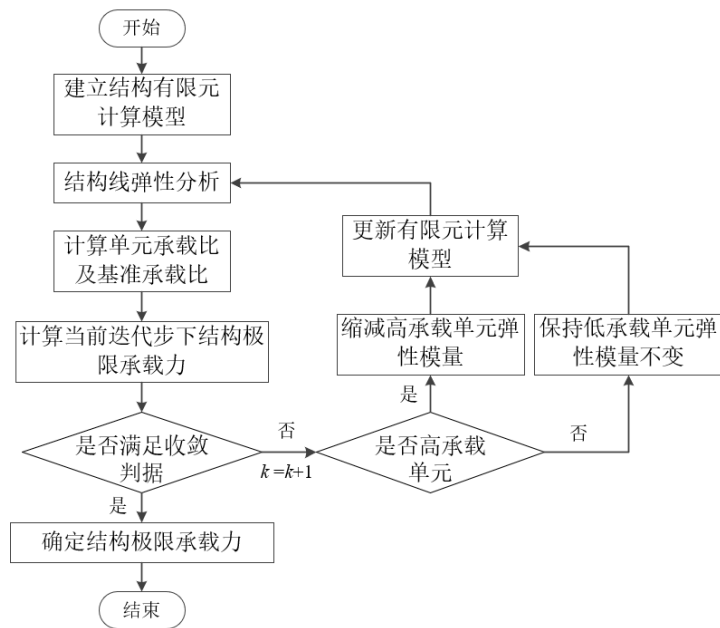


图2 弹性模量缩减法计算流程

9.1.4 主拱两层面承载力优化可采用附录C 工程结构两层面承载力设计与优化方法,计算流程见图 3。

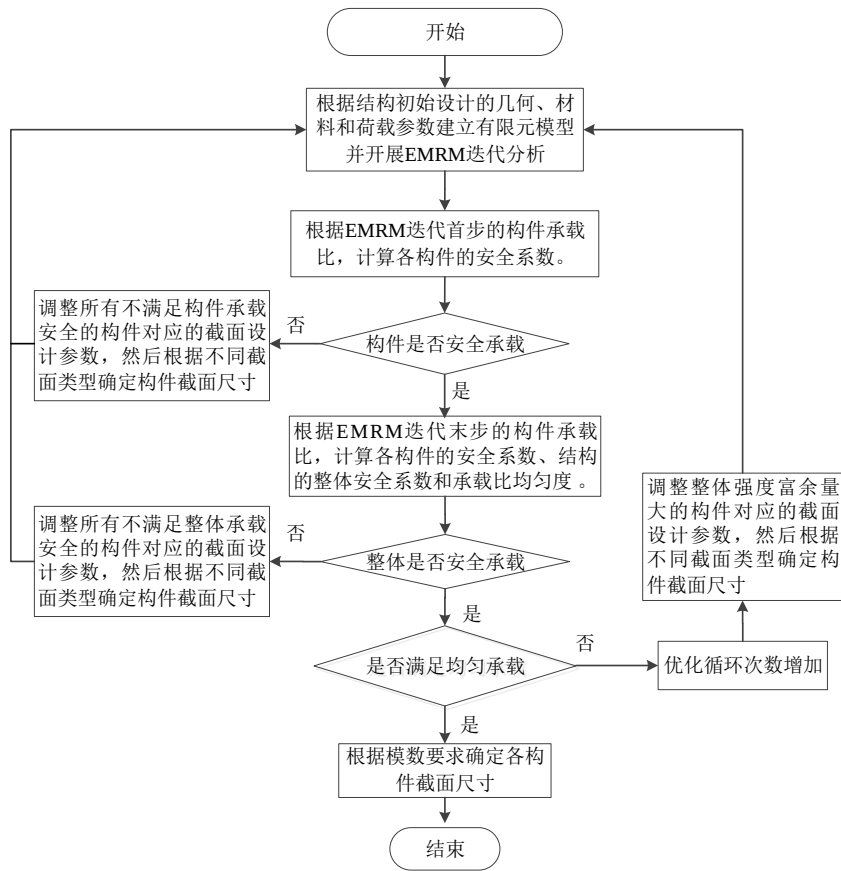


图3 工程结构两层面承载力设计与优化流程

9.1.5 钢结构及组合结构桥面系应根据 JTG D64 的有关规定验算疲劳荷载，并验算桥面与吊索连接位置的局部构造。

9.1.6 桥墩和桥台结构设计应符合 JTG 3362 的有关规定。

9.1.7 地基与基础的结构设计应符合 JTG 3363 的有关规定。

9.2 计算模型

9.2.1 钢管混凝土拱桥主拱宜采用梁单元建模，并应计入桥面荷载作用和桥面刚度影响，且应施加下部结构对上部结构的约束作用。

9.2.2 结构设计采用空间有限元计算模型时，主拱肋宜采用空间梁单元模拟，相邻腹杆间主拱肋单元划分数不宜小于 4 个。吊杆宜采用杆单元模拟。

9.3 构件承载力设计

9.3.1 轴心受压、压弯组合内力作用下圆形截面钢管混凝土构件（见图 4）承载力设计应符合下列规定：

a) 构件承载力应按下列公式验算：

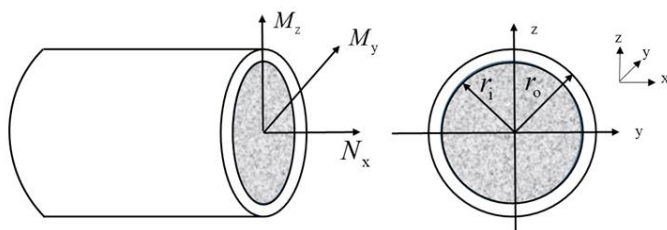


图4 圆形钢管混凝土构件的截面几何参数和内力

$$\gamma \left[\frac{N_d}{K_p K_d N_{Rd}} + G(\xi_d, \varphi) J(\xi_d) \left(\frac{N_d}{K_p K_d N_{Rd}} \right)^{0.309} \left(\frac{M_d}{M_{Rd}} \right)^{0.691} + \frac{M_d}{M_{Rd}} \right] \leq 1 \quad (8)$$

$$G(\xi_d, \varphi) = 1 + (-2.845 - 3.280\xi_d)(1 - \varphi) + (1.062 + 4.201\xi_d)(1 - \varphi)^2 \quad (9)$$

$$J(\xi_d) = -1.135 + 1.222\xi_d - 0.728\xi_d^2 + 0.195\xi_d^3 - 0.019\xi_d^4 \quad (10)$$

式中：

γ ——结构重要性系数，取 $\gamma = 1.1$ ；

N_d ——构件轴向力设计值（kN）；

M_d ——构件弯矩设计值（kN·m）， $M_d = \sqrt{M_{dy}^2 + M_{dz}^2}$ ；

M_{dy} ——构件绕y轴的弯矩设计值（kN·m）；

M_{dz} ——构件绕z轴的弯矩设计值（kN·m）；

N_{Rd} ——构件抗压强度设计值（kN）， $N_{Rd} = \varphi f_{sc} A_{sc}$ ；

M_{Rd} ——构件抗弯强度设计值（kN·m）， $M_{Rd} = \gamma_m W_{sc} f_{sc}$ ；

A_{sc} ——构件截面积（m²）， $A_{sc} = \pi r_o^2$ ；

W_{sc} ——构件截面抗弯模量（m³）， $W_{sc} = (\pi r_o^3)/4$ ；

I_{sc} ——构件截面惯性矩（m⁴）；

K_p ——钢管初应力折减系数，按第9.3.3条计算；

K_d ——钢管混凝土脱空折减系数，满足第9.3.4条脱空条件时，可取 $K_d = 0.95$ 计算；

γ_m ——构件截面塑性发展系数， $\gamma_m = 1.30 + 0.62 \ln(\xi_k + 0.06)$ ；

r_o ——构件截面外径（m）；

φ ——稳定系数，应采用GB/T 51446的计算方法；

$$\varphi = \begin{cases} 1, & \lambda \leq \lambda_0 \\ a\lambda^2 + b\lambda + c, & \lambda_0 < \lambda \leq \lambda_p \\ \frac{d}{(\lambda+35)^2}, & \lambda > \lambda_p \end{cases} \dots\dots\dots (11)$$

$$a = \frac{1+(35+2\lambda_p-\lambda_0)e}{(\lambda_p-\lambda_0)^2}, \quad b = e - 2a\lambda_p, \quad c = 1 - a\lambda_0^2 - b\lambda_0 \dots\dots\dots (12)$$

$$d = \left[13000 + 4657 \ln \left(\frac{235}{f_y} \right) \right] \left(\frac{25}{f_{ck}+5} \right)^{0.3} \left(\frac{\alpha_s}{0.1} \right)^{0.05} \dots\dots\dots (13)$$

$$e = \frac{-d}{(\lambda_p+35)^3} \dots\dots\dots (14)$$

$$\lambda_p = \frac{1743}{\sqrt{f_y}}, \quad \lambda_0 = \pi \sqrt{\frac{420\xi_k+550}{(1.02\xi_k+1.14)f_{ck}}} \dots\dots\dots (15)$$

$$\lambda = \frac{l_1}{i}, \quad i = \sqrt{\frac{I_{sc}}{A_{sc}}} \dots\dots\dots (16)$$

式中:

λ ——构件的长细比;

λ_p ——构件弹性失稳的界限长细比;

λ_0 ——构件弹塑性失稳的界限长细比;

l_1 ——构件计算长度, 按照构件所在主拱单肢构件相邻腹杆间长度计算 (m);

i ——单肢构件截面回转半径 (m)。

b) 当构件承载力不满足上述式(8)要求时, 应采用下列两种方式对构件截面参数进行调整:

1) 构件截面参数应按下列公式进行调整:

$$x_1 = \alpha_1 x_0 \dots\dots\dots (17)$$

$$\alpha_1 = \begin{cases} 1, & K_1 \geq [K_0] \\ \left(\frac{[K_0]}{K_1} \right)^{S\gamma_1}, & K_1 < [K_0] \end{cases} \dots\dots\dots (18)$$

$$K_1 = \frac{1}{\gamma \left[\frac{N_d}{K_p K_d N_{Rd}} + G(\xi_d, \varphi) J(\xi_d) \left(\frac{N_d}{K_p K_d N_{Rd}} \right)^{0.309} \left(\frac{M_d}{M_{Rd}} \right)^{0.691} + \frac{M_d}{M_{Rd}} \right]} \dots\dots\dots (19)$$

式中:

x_0 ——调整前的构件截面参数, 可根据实际情况选取截面积、截面惯性矩等;

x_1 ——调整后的构件截面参数;

α_1 ——构件承载力设计时的截面参数调整系数;

$[K_0]$ ——构件安全系数限值, 考虑重要性系数、荷载分项系数和材料分项系数时, 可取 $[K_0] = 1.0$;

K_1 ——构件承载力设计时的构件计算安全系数, 可根据附录C计算;

γ_1 ——构件承载力设计时的强度比指数, 根据附录C计算;

S ——计算参数, 根据本规程附录A的式A. 2至A. 6中齐次广义屈服函数最高阶次取值: 式A. 2至A. 5, $S=1$; 式A. 6, $S=4$ 。

2) 构件截面调整参数选取截面积时, 截面积可采用下列公式进行调整:

$$\alpha_1 = \begin{cases} 1, & K_1 \geq [K_0] \\ \left(\frac{[K_0]}{K_1} \right), & K_1 < [K_0] \end{cases} \dots\dots\dots (20)$$

$$A_{sc,1} = \alpha_1 A_{sc,0} \dots\dots\dots (21)$$

$$D_1 = 2\sqrt{\frac{A_{sc,1}}{\pi}} \dots\dots\dots (22)$$

$$T_1 = \frac{D_1}{2} \left(1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{\xi_k}{\alpha_f}}} \right) \dots\dots\dots (23)$$

式中:

$A_{sc,0}$ ——优化设计调整前构件截面积;

$A_{sc,1}$ ——优化设计调整后构件截面积;

D_1 ——优化设计调整后的钢管外径;

T_1 ——优化设计调整后的钢管壁厚;

α_f ——钢材标准值与混凝土标准值之比, 即 $\alpha_f = f_y/f_{ck}$ 。

c) 重复上述式(8)至式(23), 直至所有钢管混凝土受压构件都满足式(8)构件承载力设计要求。

9.3.2 轴心受压、压弯组合内力作用下哑铃形截面钢管混凝土构件(见图1)承载力设计应符合下列规定:

a) 构件承载力应按下列公式验算:

$$\gamma \left[\frac{N_d}{K_p K_d N_{Rd}} + G(\xi_d, \varphi) J(\xi_d) \left(\frac{N_d}{K_p K_d N_{Rd}} \right)^{0.294} \left(\sqrt{\left(\frac{M_{dy}}{M_{Rdy}} \right)^2 + \left(\frac{M_{dz}}{M_{Rdz}} \right)^2} \right)^{0.706} + \sqrt{\left(\frac{M_{dy}}{M_{Rdy}} \right)^2 + \left(\frac{M_{dz}}{M_{Rdz}} \right)^2} \right] \leq 1 \quad (24)$$

$$G(\xi_d, \varphi) = 1 + (-1.480 - 4.039\xi_d)(1 - \varphi) + (-0.042 + 14.090\xi_d)(1 - \varphi)^2 \dots\dots\dots (25)$$

$$J(\xi_d) = -1.002 + 0.958\xi_d - 0.733\xi_d^2 + 0.241\xi_d^3 - 0.028\xi_d^4 \dots\dots\dots (26)$$

式中:

γ ——结构重要性系数, 取 $\gamma = 1.1$;

N_{Rd} ——构件抗压强度设计值(kN), $N_{Rd} = \varphi[2A_{sc}f_{sc} + A_{sw}f_{sd}]$;

M_{Rdy} ——构件面内抗弯强度设计值(kN·m), $M_{Rdy} = \gamma_m^d W_{scy} f_{sc}$;

M_{Rdz} ——构件面外抗弯强度设计值(kN·m), $M_{Rdz} = \gamma_m W_{scz} f_{sc}$;

W_{scy} ——截面绕y轴的抗弯模量(m^3), $W_{scy} = \frac{1}{48H} [48\pi r_o^4 + 12\pi r_o^2(2r_o + h)^2 + 16th^3]$;

W_{scz} ——截面绕z轴的抗弯模量(m^3), $W_{scz} = (\pi r_o^3)/2$;

γ_m^d ——构件面内抗弯塑性发展系数, $\gamma_m^d = 1.05 + 0.29\ln(\xi_k - 0.27)$;

φ ——稳定系数, 按下列公式计算:

$$\varphi = e^{-0.0051\left(\frac{l_2}{i} - 16\right)} \dots\dots\dots (27)$$

l_2 ——拱等效计算长度, 采用0.36倍拱轴线长度(m)。

b) 当构件承载力不满足上述式(24)要求时, 应采用附录C对构件截面参数进行调整。

c) 重复上述式(24)至式(27), 直至所有钢管混凝土受压构件都满足式(24)构件承载力设计要求。

9.3.3 钢管混凝土构件钢管初应力折减系数应按下列公式计算:

$$K_p = 1 - 0.2\omega \dots\dots\dots (28)$$

$$\omega = \frac{\sigma_0}{f_{sd}} \dots\dots\dots (29)$$

式中:

ω ——钢管初应力度, ω 不应超过0.65;

σ_0 ——钢管初应力(MPa), 取主拱钢管截面初应力的最大值。

9.3.4 钢管内混凝土脱空率应符合下列要求:

- a) 钢管混凝土主拱不得出现周边均匀形胶空缺陷。
b) 钢管混凝土球冠形脱空缺陷（见图 5）的脱空率应按下式计算：

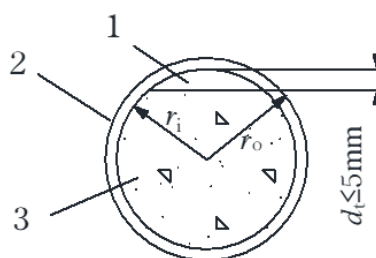


图5 球冠形脱空示意

1—球冠形脱空；2—钢管；3—钢管内混凝土

$$\chi_s = \frac{d_s}{2r_o} \dots\dots\dots (30)$$

式中：

χ_s ——球冠形脱空的脱空率；

d_s ——球冠形脱空的最大高度（m）。

- c) 当钢管混凝土球冠脱空率大于 0.6%，或脱空高度大于 5mm 时，应对钢管内混凝土脱空缺陷进行修补灌注。

9.3.5 轴心受拉作用下钢管混凝土构件承载力设计应符合下列规定：

- a) 构件承载力应按下列式验算：

$$\frac{\gamma N_d}{(1.1 - 0.4\alpha_s)A_s f_{sd}} \leq 1 \dots\dots\dots (31)$$

式中：

γ ——结构重要性系数，取 $\gamma = 1.1$ 。

- b) 当构件承载力不满足上述式（31）要求时，可采用式（20）至（23）对构件截面进行调整，其中 K_1 按下式计算：

$$K_1 = \frac{(1.1 - 0.4\alpha_s)A_s f_{sd}}{\gamma N_d} \dots\dots\dots (32)$$

- c) 重复上述式（31）和式（32），直至所有钢管混凝土受拉构件都满足式（31）构件承载力设计要求。

9.3.6 剪力作用下钢管混凝土构件承载力设计应符合下列规定：

- a) 构件承载力应按下列公式验算：

$$\frac{\gamma V_d}{\gamma_v A_{sc} \tau_{sc}} \leq 1 \dots\dots\dots (33)$$

$$\gamma_v = \begin{cases} 0.85, & \xi_k \geq 0.85 \\ 1.00, & \xi_k < 0.85 \end{cases} \dots\dots\dots (34)$$

式中：

γ ——结构重要性系数，取 $\gamma = 1.1$ ；

V_d ——构件剪力设计值（kN）；

γ_v ——截面抗剪修正系数。

- b) 当构件承载力不满足上述式（31）要求时，可采用式（20）至（23）对构件截面进行调整，其中 K_1 按下式计算：

$$K_1 = \frac{\gamma_v A_{sc} \tau_{sc}}{\gamma V_d} \dots \dots \dots (35)$$

c) 重复上述式(33)至式(35)，直至所有钢管混凝土受拉构件都满足式(33)构件承载力设计要求。

9.3.7 轴心受压、压弯组合内力作用下圆钢管构件(见图6)承载力应符合下列规定:

a) 构件承载力应按下列公式验算:

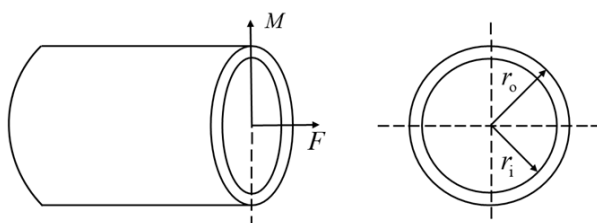


图6 钢管构件截面的几何参数和内力

$$\gamma \left[\frac{N_d}{\varphi N_{Rd}} + S_1(a_E) S_2(a_G) S_3(a_F) \left(\frac{N_d}{\varphi N_{Rd}} \right)^{0.0837} \left(\frac{M_d}{M_{Rd}} \right)^{0.9163} + \frac{M_d}{M_{Rd}} \right] \leq 1 \dots \dots \dots (36)$$

$$S_1(a_E) = 0.0304 + 6.5774a_E - 5.4382a_E^2 \dots \dots \dots (37)$$

$$S_2(a_G) = -0.1847 + 0.2126a_G - 0.0258a_G^2 \dots \dots \dots (38)$$

$$S_3(a_F) = 0.7469 - 1.2523a_F + 1.0271a_F^2 \dots \dots \dots (39)$$

$$a_E = \frac{\varphi N_{Rd}}{N_{cr}}, \quad a_G = \frac{M_{2yd}}{M_{1yd}}, \quad a_F = \frac{M_{2zd}}{M_{1zd}}, \quad N_{cr} = \frac{\pi^2 EA}{\lambda^2} \dots \dots \dots (40)$$

式中:

γ ——结构重要性系数, 安全等级一级、二级和三级的结构取 1.1、1.0 和 0.9;

N_{Rd} ——构件抗压强度设计值(kN), $N_{Rd} = \pi(r_o^2 - r_i^2)f_{sd}$;

M_{Rd} ——构件抗弯强度设计值(kN·m), $M_{Rd} = \frac{\pi \gamma_m}{4}(r_o^3 - r_i^3)f_{sd}$;

M_d ——构件弯矩设计值(kN·m), $M_d = \max\left(\sqrt{M_{1yd}^2 + M_{1zd}^2}, \sqrt{M_{2yd}^2 + M_{2zd}^2}\right)$;

M_{1yd} ——构件绕 y 轴两个端弯矩设计值中的大值(kN·m), 构件无反弯点时取同号, 构件有反弯点时取异号, 即 $|M_{1yd}| \geq |M_{2yd}|$;

M_{2yd} ——构件绕 y 轴两个端弯矩设计值中的小值(kN·m);

M_{1zd} ——构件绕 z 轴两个端弯矩设计值中的大值(kN·m), 构件无反弯点时取同号, 构件有反弯点时取异号, 即 $|M_{1zd}| \geq |M_{2zd}|$;

M_{2zd} ——构件绕 z 轴两个端弯矩设计值中的小值(kN·m);

φ ——稳定系数, 应采用GB 50017的计算方法:

$$\varphi = \begin{cases} 1 - \alpha_1 \lambda_n^2, & \lambda_n \leq 0.215 \\ \frac{1}{2\lambda_n^2} \left[(\alpha_2 + \alpha_3 \lambda_n + \lambda_n^2) - \sqrt{(\alpha_2 + \alpha_3 \lambda_n + \lambda_n^2)^2 - 4\lambda_n^2} \right], & \lambda_n > 0.215 \end{cases} \dots \dots \dots (41)$$

$$\lambda_n = \frac{\lambda}{\pi} \sqrt{\frac{f_y}{E_s}} \dots \dots \dots (42)$$

$$\alpha_1 = 0.650, \quad \alpha_2 = 0.965, \quad \alpha_3 = 0.300 \dots \dots \dots (43)$$

式中:

λ ——构件的长细比;

λ_n ——构件的相对长细比;

N_{cr} ——欧拉临界力(kN);

γ_m ——截面塑性发展系数，圆管截面取1.15。

- b) 当构件承载力不满足上述式(36)要求时，可采用式(20)至(23)对构件截面积进行调整， K_1 按下式计算：

$$K_1 = \frac{1}{\gamma \left[\frac{N_d}{\varphi N_{Rd}} + S_1(a_E)S_2(a_G)S_3(a_F) \left(\frac{N_d}{\varphi N_{Rd}} \right)^{0.0837} \left(\frac{M_d}{M_{Rd}} \right)^{0.9163} + \frac{M_d}{M_{Rd}} \right]} \dots\dots\dots (44)$$

- c) 重复上述式(36)至(44)，直至所有圆钢管受压弯构件都满足式(36)构件承载力设计要求。

9.3.8 拉弯组合内力作用下圆钢管构件承载力应符合下列规定：

- a) 构件承载力应按下列公式验算

$$\gamma \left[\left(\frac{N_d}{N_{Rd}} \right)^4 + 2.296 \left(\frac{N_d}{N_{Rd}} \right)^3 \left(\frac{M_d}{M_{Rd}} \right) + 3.491 \left(\frac{N_d}{N_{Rd}} \right)^2 \left(\frac{M_d}{M_{Rd}} \right)^2 + 0.249 \left(\frac{N_d}{N_{Rd}} \right) \left(\frac{M_d}{M_{Rd}} \right)^3 + \left(\frac{M_d}{M_{Rd}} \right)^4 \right]^{\frac{1}{4}} \leq 1 \dots (45)$$

$$N_{Rd} = \pi(r_o^2 - r_i^2)f_{sd}, \quad M_{Rd} = \frac{4}{3}(r_o^3 - r_i^3)f_{sd} \dots\dots\dots (46)$$

式中：

γ ——结构重要性系数，安全等级一级、二级和三级的结构取1.1、1.0和0.9。

- b) 当构件承载力不满足上述式(45)要求时，可采用式(20)至(23)对构件截面积进行调整， K_1 按下式计算：

$$K_1 = \frac{1}{\gamma \left[\left(\frac{N_d}{N_{Rd}} \right)^4 + 2.296 \left(\frac{N_d}{N_{Rd}} \right)^3 \left(\frac{M_d}{M_{Rd}} \right) + 3.491 \left(\frac{N_d}{N_{Rd}} \right)^2 \left(\frac{M_d}{M_{Rd}} \right)^2 + 0.249 \left(\frac{N_d}{N_{Rd}} \right) \left(\frac{M_d}{M_{Rd}} \right)^3 + \left(\frac{M_d}{M_{Rd}} \right)^4 \right]^{\frac{1}{4}}} \dots\dots\dots (47)$$

- c) 重复上述式(45)至式(47)，直至所有圆钢管拉弯构件都满足式(45)构件承载力设计要求。

9.3.9 中、下承式度钢管混凝土拱桥吊索和系杆索承载力应符合下列规定：

- a) 构件承载力应按下列公式验算：

$$\frac{\gamma_s N_d}{f_{pk} A_s} \leq 1 \dots\dots\dots (48)$$

式中：

γ_s ——吊索和系杆索承载力计算的综合系数，不应小于表2的规定值；

f_{pk} ——吊索和系杆索抗拉强度标准值(kPa)；

A_s ——吊索和系杆索钢丝的截面面积(m^2)。

表2 吊索和系杆索的综合系数 γ_s

材料类别		持久状况	短暂状况	偶然状况、地震状况
吊索	钢丝、钢绞线	2.5	2.0	1.5
系杆索	钢丝、钢绞线	2.0	1.8	1.5

- b) 当构件承载力不满足上述式(48)要求时，可采用式(20)至(23)对构件截面积进行调整， K_1 按下式计算：

$$K_1 = \frac{f_{pk} A_s}{\gamma_s N_d} \dots\dots\dots (49)$$

- c) 重复上述式(48)和式(49)，直至所有吊索和系杆索构件都满足式(48)构件承载力设计要求。

9.4 主拱稳定极限承载力设计

9.4.1 主拱稳定极限承载力设计应符合下列规定：

a) 主拱非线性稳定安全系数应满足下式要求：

$$K^s \geq [K^s] \quad (50)$$

式中：

K^s ——主拱非线性稳定安全系数，可采用附录 A 式 (A.10) 计算；

$[K^s]$ ——主拱非线性稳定安全系数限值，当荷载及材料强度均采用标准值时不应低于 1.75。

b) 当主拱非线性稳定安全系数不满足式 (50) 要求时，哑铃形构件采用附录 C 对构件截面参数进行调整，圆形构件采用下列两种方式对构件截面参数进行调整：

1) 构件截面参数应按下列公式进行调整：

$$x_1 = \alpha_M x_0 \quad (51)$$

$$\alpha_M = \begin{cases} 1, & K_M \geq [K^s] \\ \left(\frac{[K^s]}{K_M}\right)^{S\gamma_M}, & K_M < [K^s] \end{cases} \quad (52)$$

式中：

α_M ——稳定极限承载力设计时的构件截面参数调整系数；

K_M ——稳定极限承载力设计时的构件计算安全系数，根据附录 C 计算；

γ_M ——稳定极限承载力设计时的构件强度比指数，根据附录 C 计算；

S ——计算系数，根据附录 C 计算时取 $S = 1$ 。

2) 构件截面调整参数选取截面积时，截面积可采用下列公式进行调整：

$$\alpha_M = \begin{cases} 1, & K_M \geq [K^s] \\ \frac{[K^s]}{K_M}, & K_M < [K^s] \end{cases} \quad (53)$$

$$A_{sc,1} = \alpha_M A_{sc,0} \quad (54)$$

$$D_1 = 2 \sqrt{\frac{A_{sc,1}}{\pi}} \quad (55)$$

$$T_1 = \frac{D_1}{2} \left(1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{\xi_k}{\alpha_f}}} \right) \quad (56)$$

c) 应根据调整后的构件截面尺寸，再采用第 9.3 节进行构件承载力设计，进而重复上述式 (50) 至式 (56)，直至主拱非线性稳定安全系数满足式 (50) 主拱稳定极限承载力设计要求。

9.5 主拱两层面承载力优化

9.5.1 主拱两层面承载力优化设计应符合下列规定：

a) 主拱两层面承载力优化设计应满足第 9.3 和 9.4 节的两层面承载力设计要求，同时应满足下列公式要求：

$$\left| \frac{d_1 - d_0}{d_0} \right| \leq \varepsilon_d \quad (57)$$

$$d_k = \frac{\overline{b_k} + b_k^{\min}}{b_k + b_k^{\max}}, \quad k = 0, 1 \quad (58)$$

$$\overline{b_k} = \frac{1}{n} \sum_{c=1}^n b_k^c, \quad k = 0, 1 \quad (59)$$

$$b_k^{\min} = \min(b_k^c | c = 1, 2, \dots, n) \quad (60)$$

$$b_k^{\max} = \max(b_k^c | c = 1, 2, \dots, n) \quad (61)$$

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/63714401610006115>