



团 体 标 准

T/SDHTS XXXXX-XXXX
代替 T/SDHTS XXXXX-XXXX

钢管混凝土拱桥设计技术规程

Technical specifications for design of concrete-filled steel
tubular arch bridges

(征求意见稿)

在提交反馈意见时，请将您知道的相关专利连同支持性文件一并附上。

XXXX-XX-XX 发布

XXXX-XX-XX 实施

山东公路学会 发 布

目次

前言 错误！未定义书签。

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 2

4 符号 5

5 材料 11

6 基本规定 14

7 持久状况承载能力极限状态计算 17

8 持久状况正常使用极限状态计算 30

9 总体设计及构造 31

10 附属构造 34

11 防腐构造与涂装 34

目 次

本文件按照 GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由山东高速建设管理集团有限公司提出。

本文件由山东公路学会归口。

本文件起草单位：山东高速建设管理集团有限公司、山东省交通规划设计院集团有限公司、福州大学、山东省公路桥梁建设集团有限公司。

本文件主要起草人：尹永胜、徐召、吴庆雄、徐常泽、王宏博、马亚、黄卿维、管锡琨、赵洪蛟、李莹炜、侯亚辉、李岩、黄育凡、刁荣亭。

钢管混凝土拱桥设计技术规

1 范围

本标准规定了钢管混凝土拱桥的设计技术标准。

本标准适用于城市桥梁与公路桥梁中钢管混凝土拱桥的设计。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅所注日期的版本适用于本文件。凡是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 3323	金属熔化焊焊接接头射线照相
GB/T 5210	色漆和清漆拉开法附着力试验
GB/T 5224	预应力混凝土用钢绞线
GB/T 8923.1	涂覆涂料前钢材表面处理-表面清洁度的目视评定
GB/T 9286	色漆和清漆漆膜的划格试验
GB/T 9793	热喷涂 金属和其他无机覆盖层 锌、铝及其合金
GB/T 11374	热喷涂涂层厚度的无损测量方法
GB/T 13288.2	涂覆涂料前钢材表面处理-喷射清理后的钢材表面粗糙度特性
GB/T 13452.2	色漆和清漆 漆膜厚度的测定
GB/T 17101	桥梁缆索用热镀锌钢丝
GB/T 18365	斜拉桥热挤聚乙烯高强钢丝拉索技术条件
GB/T 42673	钢管无损检测 铁磁性无缝和焊接钢管表面缺欠的磁粉检测
GB 50017	钢结构设计标准
GB/T 50081	普通混凝土力学性能试验方法标准
GB/T 50082	普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准

GB/T 50107	混凝土强度检验评定标准
GB 50164	混凝土质量控制标准
GB 50661	钢结构焊接规范
GB 50923	钢管混凝土拱桥技术规范
CJJ 11	城市桥梁设计规范
CJJ 99	城市桥梁养护技术规范
CJJ 166	城市桥梁抗震设计规范
JGJ 55	普通混凝土配合比设计规程
JGJ/T 283	自密实混凝土应用技术规程
JT/T 722	公路桥梁钢结构防腐涂装技术条件
JTG/T B02-01	公路桥梁抗震设计细则
JTG/T H21	公路桥梁技术状况评定标准
JTG D60	公路桥涵设计通用规范
JTG D61	公路圬工桥涵设计规范
JTG/T D65-06	公路钢管混凝土拱桥设计规范
JTG 3362	公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范
JTG/T 3365-01	公路斜拉桥设计规范
JTG/T 3650	公路桥涵施工技术规范
JTG 5120	公路桥涵养护规范
TB/T 2486	铁路钢梁涂膜劣化评定

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 tube (CFST) arch bridge

以圆形钢管混凝土为基本单元所形成的拱肋为主要承重结构的桥梁。

3.2

钢管混凝土拱肋 CFST arch rib

主要承重单元为钢管混凝土的拱肋。

3.3

钢管拱肋 steel tube arch rib

施工过程中钢管内未填充混凝土的拱肋。

3.4

管内混凝土 concrete in tube

浇注在钢管内的混凝土，又称核心混凝土。

3.5

钢管混凝土构件 CFST member

在钢管内浇注混凝土，并由钢管和管内混凝土共同承担荷载的构件。

3.6

单圆管拱肋 single tube arch rib

截面为单个圆钢管混凝土的拱肋。

3.7

哑铃形拱肋 dumbbell shape arch rib

截面由上下两个单圆钢管混凝土和两块连接钢腹板组成的拱肋。

3.8

桁式拱肋 truss arch rib

由上下钢管混凝土弦杆通过腹杆组成桁式的拱肋。

3.9

钢管混凝土格构柱 CFST laced column

由若干钢管混凝土主肢和空钢管缀件组成的柱子。

3.10

刚架系杆拱 rigid-frame tied arch

拱肋与桥墩固结，以系杆索的预加力来平衡拱部分水平推力的结构。

3.11

下承式刚架系杆拱 rigid-frame tied through arch

全部桥面系悬挂在拱肋以下的刚架系杆拱。

3.12

中承式刚架系杆拱 rigid-frame tied half-through arch

由多跨组成，主跨为中承式，两端边跨为上承式悬臂半拱，系杆索锚固在边跨端部的刚架系杆拱，又称飞鸟式拱或飞燕式拱。

3.13

约束效应系数 confinement or hooping coefficient

反映钢管对核心混凝土约束效应的系数，又称约束套箍系数。

3.14

钢管初应力 initial stress or preloading of steel tube

因钢管构件先于管内混凝土施工而在钢管混凝土组合作用形成前作用于钢管中的纵向正应力，又称钢管混凝土初应力。

3.15

初应力度 initial stressing ratio or preloading ratio

钢管初应力与其钢材屈服强度的比值。

3.16

计算合龙温度 computational closure temperature

管内混凝土形成设计强度时，通过换算确定的钢管混凝土拱肋温度内力为零时所对应的截面平均温度。

3.17

相贯节点 intersection joint

主管和支管直接通过相贯线焊接的节点。

3.18

球冠形脱空 spherical gap

管内混凝土与钢管之间形成类似球冠形状空隙的现象。

3.19

月牙形脱空 crescent gap

由温度荷载、管内混凝土收缩等非施工质量原因形成的管内混凝土与钢管之间类似月牙形状空隙的现象。

3.20

脱空率 debonding rate

钢管混凝土横截面上产生脱空截面积与钢管混凝土截面积的比值。

3.21

脱空角度率 debonding angle rate

钢管混凝土横截面上产生月牙形脱空区域对应圆心角与整个截面角度的比值。

3.22

强健性设计 robust design

为提高钢管混凝土拱桥结构在面临无法预料的作用（如冲撞、爆炸、袭击、主要构件失效等）时的抵抗能力，确保结构能以一定比例限制破坏或失效的范围，并在某段时间内继续服役所进行的设计。

4 符号

4.1 荷载和荷载效应

N ——截面轴向力设计值；

N_1, N_2 ——分配到哑铃形拱肋两个肢管上的轴向力值；

M ——截面弯矩设计值；

M_1, M_2 ——分配到哑铃形拱肋两个肢管上的弯矩值；

N_s ——轴向压力组合设计值；

N_0 ——钢管混凝土单圆管截面轴心抗压强度设计值；

N_0' ——考虑脱空影响的钢管混凝土单圆管截面轴心抗压强度设计值；

N_0^i ——拱肋截面各肢钢管混凝土截面轴心抗压强度设计值；

N_{0i} ——桁式拱肋第*i*根弦杆轴心抗压强度设计值；

N_{01} ——钢管混凝土单圆管截面偏心抗压强度设计值；

N_{02} ——钢管混凝土单圆管偏心受压构件稳定承载力设计值；

N_D ——钢管混凝土哑铃形和格构柱构件截面轴心抗压强度设计值；

N_{D1} ——钢管混凝土哑铃形构件和格构柱偏心抗压强度设计值；

N_{D2} ——考虑吊杆断裂冲击的吊杆作用力；

N_f^i ——与钢管混凝土主肢共同承担荷载的连接钢板的抗压强度设计值；

S ——荷载效应的组合设计值；

R ——构件承载力设计值；

$R(\cdot)$ ——构件的承载力函数；

R_n ——外荷载作用在基本结构上引起的吊杆 n 处对应的支承反力；

V_1 ——腹杆所受轴力设计值；

σ ——吊索或系杆索的应力；

σ_0 ——钢管初应力。

4.2 材料指标

$(EA)_{sc}$ ——钢管混凝土拱肋截面整体压缩设计刚度；

$(EI)_{sc}$ ——钢管混凝土拱肋截面整体弯曲设计刚度；

$(EA)_{sc1}$ ——钢管混凝土毛截面压缩设计刚度；

$(EI)_{sc1}$ ——钢管混凝土毛截面弯曲设计刚度；

$(EA)_{sc2}$ ——单肢钢管混凝土毛截面压缩设计刚度；

$(EI)_{sc2}$ ——单肢钢管混凝土毛截面弯曲设计刚度；

E_c ——混凝土弹性模量；

E_s ——钢材弹性模量；

E_{gs} ——加劲纵梁的弹性模量；

f_{cd} ——混凝土轴心抗压强度设计值；

f_{ck} ——混凝土轴心抗压强度标准值；

f_d ——材料强度设计值；

f_{vd} ——钢材抗剪强度设计值；

f_s ——钢材抗拉、抗压和抗弯强度设计值；

f_{td} ——混凝土轴心抗拉强度设计值；

f_{tk} ——混凝土轴心抗拉强度标准值；

f_y ——钢材强度标准值；

G_c ——混凝土剪切变形模量；

G_s ——钢材剪切变形模量；

f_{tpk} ——吊索或系杆索的抗拉强度标准值；

α ——钢管混凝土拱肋受截面均匀温度作用时轴线方向的线膨胀系数；

α_s ——钢板或钢材线膨胀系数；

α_c ——混凝土材料线膨胀系数；

ρ_s ——钢材的密度；

μ_c ——混凝土的泊松比；

μ_s ——钢材的泊松比。

4.3 几何参数

a_d ——几何参数设计值；

A ——柱肢截面换算面积；

A_b ——一个节间内各平腹杆面积之和；

A_c ——钢管内混凝土的截面面积；

A_d ——一个节间内各斜腹杆面积之和；

A_{fs} ——连接钢板的截面面积；

A_s ——钢管的截面面积；

A_{sc} ——钢管混凝土构件的组合截面面积；

A_{s1} ——拱肋截面钢材面积；

A_{c1} ——拱肋截面混凝土面积；

a_i ——钢管混凝土格构柱单根柱肢中心到虚轴y-y的距离；

b_i ——钢管混凝土格构柱单根柱肢中心到虚轴x-x的距离；

D ——钢管外径；

d ——拉索直径；

e_0 ——截面偏心距；

f ——拱的矢高；

f_1 ——桥面系以上拱肋的矢高；

h_1 ——哑铃形截面、格构柱截面受弯面内两肢中心距离；

h_2 ——哑铃形截面腹板高度；

H ——拱肋截面高度；

r ——截面计算半径；

i ——截面回转半径；

I_c ——混凝土截面惯性矩；

I_s ——钢管截面惯性矩；

I_{sc} ——钢管混凝土组合截面惯性矩；

I_{s1} ——钢材截面惯性矩；

I_{c1} ——混凝土截面惯性矩；

I_g ——加劲纵梁的截面惯性矩；

- l ——构件长度；
 L ——拱桥计算跨径；
 l_0 ——构件的计算长度；
 l_{01} ——拱肋净跨径；
 L_0 ——拱肋的等效计算长度；
 L_d ——吊索长度；
 L_z ——拱肋节段的直线段长；
 l_{0x} ——构件对X轴的计算长度；
 l_{0y} ——构件对Y轴的计算长度；
 l_1 ——格构柱柱肢节间距离；
 l_2 ——哑铃形截面腹板加劲构造间沿拱肋方向的距离；
 r_c ——钢管内混凝土横截面的半径；
 S_g ——拱轴线长度；
 t ——钢管壁厚或混凝土初凝时间；
 T ——计算合龙温度；
 T_0 ——附加升温值；
 T_{28} ——钢管内混凝土浇注后28d内的平均气温；
 ε_b ——界限偏心率；
 θ ——拱肋两节段间折角；
 Δ ——支管间隙。

4.4 计算系数及其它

- β ——钢管初应力度；
 ξ_0 、 ξ ——钢管混凝土约束效应系数设计值、标准值；
 ρ ——构件偏心率；

ρ_c ——钢管混凝土截面含钢率；

χ ——计算系数；

χ_t ——脱空率；

μ ——柔度系数；

μ_0 ——钢管混凝土拱肋汽车荷载冲击系数；

γ_0 ——桥梁结构重要性系数；

η_1 ——单肢钢管混凝土和整个构件截面抗弯刚度之比；

φ ——稳定系数；

φ_e ——偏心率折减系数；

λ ——钢管混凝土构件的名义长细比；

λ_n ——相对长细比；

λ^* ——钢管混凝土格构柱的换算长细比；

λ_1 ——钢管混凝土格构柱单肢名义长细比；

λ_x, λ_y ——钢管混凝土格构柱对X轴、对Y轴的名义长细比；

α ——有初应力的钢管混凝土极限承载力计算时，考虑长细比影响的系数；

f_0 ——钢管混凝土拱桥的一阶竖向频率；

k_c ——钢管混凝土承载力徐变折减系数；

K_p ——考虑初应力度对钢管混凝土承载力的折减系数；

k_1 ——荷载系数；

k_2 ——行车道系数；

k_3 ——轴心抗压强度设计值换算系数；

K_t ——钢管混凝土承载力脱空折减系数；

K ——换算长细比系数；

K' ——换算长细比修正系数；

m ——有初应力的钢管混凝土极限承载力计算时，考虑偏心率影响的系数；

n ——桁式拱肋弦杆数；

R_d ——脱空角度率；

V ——输送泵的额定速度；

Q ——管内混凝土浇注方量。

$\delta_{n,n}$ ——力法基本结构中吊杆 n 处作用 $M_n=1$ 引起的吊杆 n 两侧梁的相对转角；

$\Delta_{n,p}$ ——力法基本结构中由外荷载作用引起的吊杆 n 两侧梁的相对转角；

C_n ——断裂吊杆 n 的柔度系数；

L_d ——吊杆之间的距离；

D ——断裂的边吊杆和加劲纵梁端点之间的距离；

L_n ——吊杆 n 的长度；

E_n ——吊杆 n 的弹性模量；

A_n ——吊杆 n 的截面面积。

5 材料

5.1 钢材

5.1.1 钢管混凝土拱肋中的钢管宜选用质量等级为 B 级及以上的碳素结构钢或低合金高强度结构钢，其质量要求应符合现行国家标准《碳素结构钢》GB/T 700 或《低合金高强度结构钢》GB/T 1591 的规定。

5.1.2 钢管可采用卷制焊接管或无缝钢管。当满足卷制要求时，宜采用直缝焊接管。

5.1.3 钢材的主要强度指标应按表 1 采用。

表 1 钢材强度指标

钢号	厚度或直径 (mm)	设计值 (N/mm ²)		标准值 f_y (N/mm ²)
		抗拉、抗压和抗弯 f_s	抗剪 f_{vd}	
Q235	≤16	190	110	235
	>16~40	180	105	225
	>40~100	170	100	215
Q345	≤16	275	160	345

	>16~40	270	155	335
	>40~63	260	150	325
	>63~80	250	145	318
	>80~100	245	140	305
Q390	≤16	310	180	390
	>16~40	295	170	370
	>40~63	280	160	350
	>63~100	265	150	330
Q420	≤16	335	195	420
	>16~40	320	185	400
	>40~63	305	175	380
	>63~100	290	165	360

5.1.4 钢材的物理性能指标可按表 2 采用。

表 2 钢材的物理性能指标

弹性模量 E_s (N/mm ²)	剪变模量 G_s (N/mm ²)	线膨胀系数 α_s (1/°C)	密 度 ρ_s (kg/m ³)	泊松比 μ_s
2.06×10^5	7.90×10^4	1.20×10^{-5}	7.85×10^3	0.30

5.2 混凝土

5.2.1 钢管混凝土拱肋的管内混凝土应采用自密实补偿收缩混凝土，其强度等级宜为 C30~C80。

5.2.2 混凝土轴心抗压强度标准值 f_{ck} 、轴心抗压强度设计值 f_{cd} 、轴心抗拉强度标准值 f_{tk} 、轴心抗拉强度设计值 f_{td} 、弹性模量 E_c 应按表 3 采用。混凝土的剪变模量 G_c 可按表 3 中弹性模量 E_c 的 0.4 倍采用，混凝土的泊松比 μ_c 可取为 0.2。

表 3 混凝土强度和弹性模量 (N/mm²)

强度种类 强度等级	轴心抗压强度		轴心抗拉强度		弹性模量 E_c
	标准值 f_{ck}	设计值 f_{cd}	标准值 f_{tk}	设计值 f_{td}	
C30	20.10	14.30	2.01	1.43	3.00×10^4

C35	23.40	16.70	2.20	1.57	3.15×10^4
C40	26.80	19.10	2.39	1.71	3.25×10^4
C45	29.60	21.10	2.51	1.80	3.35×10^4
C50	32.40	23.10	2.64	1.89	3.45×10^4
C55	35.30	25.30	2.74	1.96	3.55×10^4
C60	38.50	27.50	2.85	2.04	3.60×10^4
C65	41.5	29.7	2.93	2.09	3.65×10^4
C70	44.5	31.8	2.99	2.14	3.70×10^4
C75	47.4	33.8	3.05	2.18	3.75×10^4
C80	50.2	35.9	3.11	2.22	3.80×10^4

5.2.3 自密实补偿收缩混凝土性能指标应满足以下要求：

- 1 力学性能：应满足设计要求；
- 2 体积稳定性能：密闭环境下混凝土自由膨胀率应控制在 $2 \times 10^{-4} \sim 6 \times 10^{-4}$ ，其稳定收敛期应小于 60d；
- 3 工作性能：其各项指标应满足表 4 的要求。

表 4 自密实补偿收缩混凝土工作性能

泵送灌注 时间 (h)	坍落度 (cm)		扩展度 (cm)		U 形填充高度 (cm)	V 形漏斗通过 时间 (s)	T_{50} (s)	初凝时间 (h)	终凝时间 (h)
≤6	入泵	3h: ≥18	入泵	3h: ≥40	≥30 无障碍	10~25	5~20	12~18	14~20
≤10	20~26	5h: ≥18	50~65	5h: ≥40				16~22	18~24

4 外加剂选择：应掺加高效减水剂和膨胀剂。选用的高效减水剂应具有保塑、缓凝的功能，减水率应大于 25%，且制备的混凝土拌和物含气量应小于 2.5%。选用的膨胀剂应对混凝土工作性能影响小、膨胀性能稳定，水中限制膨胀率 7d 大于 0.05%，空气终[温度 20℃±2℃，相对湿度 (60±5) %]21d 大于 0。

5.3 钢管混凝土

5.3.1 钢管与管内混凝土的匹配可按下列材料组合选用：

- 1 Q235 钢配 C30~C40 强度等级混凝土；
- 2 Q345 钢配 C40~C60 强度等级混凝土；
- 3 Q390 钢、Q420 钢配 C60 或 C60 以上强度等级混凝土。

5.3.2 钢管混凝土构件的钢管壁厚不应小于 10mm。钢管的外直径 D 与壁厚 t 之比宜为 $35 \times (235/f_y) \sim 100 \times (235/f_y)$ ，钢材强度标准值 f_y 取值应符合本规范表 1 的规定。

5.3.3 钢管混凝土约束效应系数设计值 ξ_0 不宜小于 0.60，截面含钢率 ρ_c 宜为 0.04~0.20。 ξ_0 、 ρ_c 应按下列公式计算：

$$\xi_0 = \frac{A_s f_s}{A_c f_{cd}} \quad (1)$$

$$\rho_c = A_s / A_c \quad (2)$$

式中： ξ_0 ——钢管混凝土约束效应系数设计值；

ρ_c ——钢管混凝土截面含钢率；

A_s ——钢管的截面面积（mm²）；

A_c ——钢管内混凝土的截面面积（mm²）；

f_s ——钢板（材）抗拉、抗压和抗弯强度设计值（N/mm²）；

f_{cd} ——混凝土轴心抗压强度设计值（N/mm²）。

5.4 其他材料

5.4.1 吊索和系杆索的高强钢丝宜采用 $\phi 5\text{mm}$ 或 $\phi 7\text{mm}$ 热镀锌钢丝，其强度标准值不宜低于 1670 N/mm²，性能要求应符合现行国家标准《桥梁缆索用热镀锌钢丝》GB/T 17101 的规定。

5.4.2 吊索和系杆索的钢绞线宜采用高强低松弛预应力镀锌或其他防护钢绞线，其强度标准值不宜低于 1860 N/mm²，性能要求应符合现行国家标准《预应力混凝土用钢绞线》GB/T 5224 的规定。

5.4.3 吊索和系杆索的锚具及连接件的钢材应选用优质碳素结构钢或合金结构钢，性能要求应符合国家现行有关标准的规定。吊索与系杆索所用防护材料不得含有对钢材有腐蚀作用的成分。

5.4.4 焊接材料应与结构钢材的性能相匹配。当两种不同强度等级的钢材相焊接时，应采用与强度较低的一种钢材相适应的焊接材料。

5.4.5 用于钢管混凝土构件或钢构件连接的紧固件，应符合国家关于普通螺栓、高强度螺栓、焊钉的现行相关标准。

6 基本规定

6.1 一般规定

6.1.1 本规范采用以概率理论为基础的极限状态设计方法，按分项系数的设计表达式进行设计。

6.1.2 钢管混凝土拱桥应按下列两类极限状态进行设计：

1 承载能力极限状态：对应于钢管混凝土拱桥或其构件达到最大承载能力，或出现不适于继续承载的变形或变位的状态。

2 正常使用极限状态：对应于钢管混凝土拱桥或其构件达到正常使用，或耐久性的某项限值的状态。

6.1.3 钢管混凝土拱桥应按持久状况承载能力极限状态和持久状况正常使用极限状态进行设计。

6.1.4 钢管混凝土拱桥抗震设计应符合现行行业标准《城市桥梁抗震设计规范》CJJ 166 或《公路桥梁抗震设计细则》JTG/T B02-01 的规定。

6.1.5 钢管混凝土拱桥中钢结构和钢构件之间的连接，包括施工阶段管内混凝土达到设计强度前的钢管拱结构，其承载力、变形和稳定性能均应按桥梁钢结构进行设计与计算，并应符合国家现行有关标准的规定。

6.1.6 钢管混凝土拱桥设计时应根据地形地质、交通运输条件和其它建设条件，确定指导性的施工方案、主要施工步骤、质量要求和施工中允许的不平衡荷载，并应明确结构体系转换的顺序及采取的措施。

6.1.7 钢管混凝土拱桥设计时应按主要施工阶段进行计算。施工阶段的计算应包括下列内容：

- 1 拱肋构件的运输、安装过程中的应力、变形和稳定计算；
- 2 与拱肋形成有关的附属结构的计算；
- 3 拱肋形成过程中自身的应力、变形和稳定计算；
- 4 成桥过程中桥梁结构的应力、变形和稳定计算。

6.1.8 施工计算中，应计入施工中可能出现的实际荷载，包括架设机具和材料、施工人群、桥面堆载以及风力、温度变化影响力和其它施工临时荷载。施工阶段结构弹性稳定特征值不应小于 4.0。

6.1.9 钢管混凝土拱肋、横撑、立柱、桥面系主梁等，应进行满足使用期间检查和养护维修要求的设计。

6.1.10 钢管混凝土拱桥的钢结构应依据桥位处的大气腐蚀环境进行防腐设计，其免维修周期不应小于 15 年。防腐体系宜根据桥梁所处环境及不同部位进行设计，不同防腐体系的钢材表面除锈等级、表面清洁度、表面粗糙度等指标要求应符合现行行业标准《公路桥梁钢结构防腐涂装技术条件》JT/T 722

的规定。

6.1.11 钢管混凝土拱桥的防水、排水和其它结构的耐久性要求，应符合国家现行有关标准的规定。

6.1.12 大跨径钢管混凝土拱桥应进行施工监测与控制，拱的轴线、内力、吊索与系杆索拉力、钢管应力等应满足设计要求。

6.1.13 钢管混凝土拱桥主题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 15 年。吊索、系杆索锚固设计应满足检查、维修和可更换的需要。

6.2 作用

6.2.1 钢管混凝土拱桥的荷载分类、效应组合与荷载计算，除应符合本规范规定外，还应根据工程性质的不同，符合现行行业标准《城市桥梁设计规范》CJJ 11 或《公路桥涵设计通用规范》JTG D60 的规定。

6.2.2 钢管混凝土拱肋的汽车荷载冲击系数 μ_0 ，可按下式计算：

$$\mu_0 = 0.05736 f_0 + 0.0748 \quad (3)$$

式中： f_0 ——钢管混凝土拱桥的一阶竖向频率（Hz）。

6.2.3 钢管混凝土拱受温度变化影响产生的变形值或由此而引起的次内力，应根据桥位处气温、桥梁结构和施工设计等因素计算确定。材料线膨胀系数和作用标准值可按下列规定取用：

1 钢管混凝土拱肋受截面均匀温度荷载时轴线方向的线膨胀系数 α 可按下式计算：

$$\alpha = \frac{\alpha_s A_s + \alpha_c A_c}{A_s + A_c} \quad (4)$$

式中： α_s ——钢材线膨胀系数（1/°C），取 1.2×10^{-5} ；

α_c ——混凝土材料线膨胀系数（1/°C），取 1.0×10^{-5} 。

2 计算钢管混凝土拱因截面均匀温度变化引起外加变形或约束变形时，应以计算合龙温度 T 为基准温度，考虑最高和最低有效温度的荷载效应。

3 计算合龙温度 T 可按下式计算：

$$T = T_{28} + \frac{D - 0.85}{0.2} + T_0 \quad (5)$$

式中： T_{28} ——钢管内混凝土浇注后 28d 内的平均气温（°C）；

D ——钢管外径（m）；

T_0 ——考虑管内混凝土水化热荷载的附加升温值，为 3.0°C~5.0°C，冬季取小值，夏季取

大值；混凝土强度等级低于 C40 时，在此基础上减去 1.0°C。

4 最高与最低有效温度可取当地最高与最低气温。

6.2.4 计算钢管混凝土拱因管内混凝土收缩而产生的变形值或由此而引起的次内力时，管内混凝土收缩可采用实测值或现行行业标准《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG 3362 的规定计算。

6.3 结构设计与计算

6.3.1 钢管混凝土拱桥的结构计算应包括静力计算、稳定计算、动力计算和节点疲劳计算等。结构计算图式、几何特性、边界条件应反映实际结构状况和受力特征。

6.3.2 当刚架系杆拱进行有限元计算时，宜将上部结构、下部结构与基础作为整体。

6.3.3 钢管混凝土拱肋截面整体压缩设计刚度 $(EA)_{sc}$ 与弯曲设计刚度 $(EI)_{sc}$ 应按下列公式计算：

$$(EA)_{sc} = E_s A_{s1} + E_c A_{c1} \quad (6)$$

$$(EI)_{sc} = E_s I_{s1} + 0.6 E_c I_{c1} \quad (7)$$

式中： $(EA)_{sc}$ ——钢管混凝土拱肋截面整体压缩设计刚度 (N)；

$(EI)_{sc}$ ——钢管混凝土拱肋截面整体弯曲设计刚度 (N·mm²)；

A_{s1} ——拱肋截面钢材面积 (mm²)；

A_{c1} ——拱肋截面混凝土面积 (mm²)；

I_{s1} ——钢材截面惯性矩 (mm⁴)；

I_{c1} ——混凝土截面惯性矩 (mm⁴)。

6.3.4 钢管混凝土拱肋截面回转半径 i 宜按下列公式计算：

$$i = \sqrt{(EI)_{sc1} / (EA)_{sc1}} \quad (8)$$

$$(EI)_{sc1} = E_s I_{s1} + E_c I_{c1} \quad (9)$$

式中： i ——截面回转半径 (mm)；

$(EA)_{sc1}$ ——钢管混凝土毛截面压缩设计刚度 (N)，可按本规范公式 (6) 计算；

$(EI)_{sc1}$ ——钢管混凝土毛截面弯曲设计刚度 (N·mm²)。

7 持久状况承载能力极限状态计算

7.1 一般规定

7.1.1 钢管混凝土拱桥应按承载能力极限状态的要求，对结构与构件进行强度和稳定性验算。

7.1.2 持久状况承载能力极限状态计算时，钢管混凝土拱桥的安全等级应根据其重要性、桥梁结构破坏可能产生后果的严重程度以及工程性质进行划分，并应符合现行行业标准《城市桥梁设计规范》CJJ 11 和《公路桥涵设计通用规范》JTG D 60 的规定。

7.1.3 钢管混凝土结构与构件的承载能力极限状态应按下列公式计算：

$$\gamma_0 S \leq R \quad (10)$$

$$R = R(f_d, a_d) \quad (11)$$

式中： γ_0 ——桥梁结构重要性系数，对安全等级为一级、二级、三级的结构或构件应分别取 1.1、1.0、0.9；桥梁抗震设计不考虑结构的重要性系数；

S ——荷载效应的组合设计值，应符合现行行业标准《公路桥涵设计通用规范》JTG D60 或《城市桥梁设计规范》CJJ 11 的规定，其中汽车荷载应计入冲击系数；

R ——构件承载力设计值；

$R(\cdot)$ ——构件的承载力函数；

f_d ——材料强度设计值；

a_d ——几何参数设计值。

7.1.4 钢管混凝土拱肋强度计算应为拱肋各组成构件，稳定计算应包括各组成构件与拱肋整体。对桁式拱肋的钢管混凝土弦管，当单肢一个节间的长细比 λ_1 小于或等于 10 时，承载力计算可仅进行强度计算，并应符合本规范第 7.2.2-7.2.5 条的规定；当 λ_1 大于 10 时，承载力计算应进行稳定计算，并应符合本规范第 7.3.3 条的规定。

7.2 拱肋强度计算

7.2.1 拱肋强度计算时，截面的内力可采用弹性理论计算。对组成哑铃形或桁肋的钢管混凝土单圆管构件，其内力可由有限元计算结果或截面内力分配计算确定。当采用截面内力分配计算哑铃形截面各肢的内力且上下两肢相同时（图 1），各肢的内力可按下列公式计算：

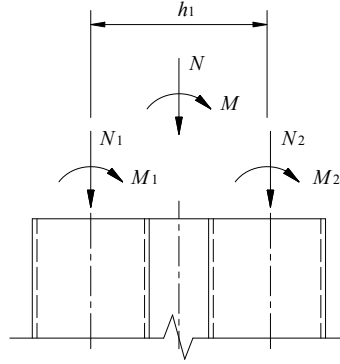


图1 哑铃形拱肋内力计算示意图

$$M_1 = M_2 = \eta_1 M \quad (12)$$

$$N_1 = \left[\frac{1}{2} + \frac{(1-2\eta_1)}{h_1} \frac{M}{N} \right] N, \quad N_2 = \left[\frac{1}{2} - \frac{(1-2\eta_1)}{h_1} \frac{M}{N} \right] N \quad (13)$$

$$\eta_1 = \frac{1}{2 + 0.5h_1^2 \chi} \quad (14)$$

$$\chi = \frac{(EA)_{sc2}}{(EI)_{sc2}} \quad (15)$$

$$(EI)_{sc2} = E_s I_s + E_c I_c \quad (16)$$

式中： N ， M ——截面轴向力设计值和弯矩设计值（ N ， $N \cdot mm$ ）；

M_1 ， M_2 ——分配到两个肢管上的弯矩值（ $N \cdot mm$ ）；

N_1 ， N_2 ——分配到两个肢管上的轴向力值（ N ）；

η_1 ——单肢钢管混凝土和整个构件截面抗弯刚度之比；

h_1 ——哑铃形截面受弯面内两肢中心距离（ mm ）；

χ ——计算系数；

I_c ——混凝土截面惯性矩（ mm^4 ）；

I_s ——钢管截面惯性矩（ mm^4 ）；

$(EA)_{sc2}$ ——单肢钢管混凝土毛截面压缩设计刚度（ N ），按本规范公式（6）计算；

$(EI)_{sc2}$ ——单肢钢管混凝土毛截面弯曲设计刚度（ $N \cdot mm^2$ ），按本规范公式（9）计算。

7.2.2 钢管混凝土单圆管截面轴心抗压强度应按下列公式计算：

$$\gamma_0 N_s \leq N_0 \quad (17)$$

$$N_0 = k_3(1.14 + 1.02\xi_0)(1 + \rho_c)f_{cd}A_c \quad (18)$$

式中： N_s ——轴向压力组合设计值（N）；

N_0 ——钢管混凝土单圆管截面轴心抗压强度设计值（N）；

ξ_0 ——钢管混凝土的约束效应系数设计值，按本规范公式（1）计算；

ρ_c ——钢管混凝土截面含钢率，按本规范公式（2）计算；

f_{cd} ——混凝土轴心抗压强度设计值（N/mm²）；

k_3 ——轴心抗压强度设计值换算系数，当钢管壁厚 $t \leq 16\text{mm}$ 时， $k_3 = 1.0$ 。当钢管壁厚 $t > 16\text{mm}$ 时，

Q235 和 Q345 钢， $k_3 = 0.96$ ；Q390 钢和 Q420 钢， $k_3 = 0.94$ 。

7.2.3 对有脱空影响的钢管混凝土单圆管截面轴心抗压强度设计值 N'_0 应按下列公式计算：

$$N'_0 = K_t N_0 \quad (19)$$

式中： N'_0 ——考虑脱空影响的钢管混凝土单圆管截面轴心抗压强度设计值（N）；

K_t ——钢管混凝土承载力脱空折减系数，按下式计算：

$$\text{球冠形脱空：} \quad K_t = \begin{cases} 0.95 & 0 < \chi_t \leq 0.6\% \\ \frac{(-0.0143\chi_t^2 + 0.8513\chi_t - 0.3902)}{(\chi_t - 0.4785)} & 0.6\% < \chi_t \leq 5\% \end{cases} \quad (20)$$

$$\text{月牙形脱空：} \quad K_t = \begin{cases} 0.9 & 0 < R_d \leq 0.2 \\ \frac{(0.8386R_d - 0.1257)}{(R_d - 0.1533)} & 0.2 < R_d \leq 0.5 \end{cases} \quad (21)$$

式中： χ_t ——脱空率；

R_d ——脱空角度率。

适用范围：混凝土 C40～C60，钢材 Q235～Q420，钢管壁厚 12mm～20mm，长细比 12～60，偏心率 0～0.5，脱空率 0～5% 和脱空角度率 0～0.5，管径 600mm～1200mm。

7.2.4 钢管混凝土单圆管截面偏心抗压强度设计值 N_{01} 应按下列公式计算：

$$\gamma_0 N_s \leq N_{01} \quad (22)$$

$$N_{01} = \varphi_e N_0 \quad (23)$$

式中： φ_e ——偏心率折减系数，按本规范第 5.2.5 条的规定计算；

N_{01} ——钢管混凝土单圆管截面偏心抗压强度设计值（N）。

7.2.5 钢管混凝土单圆管偏心抗压强度的偏心率折减系数 φ_e 应按下列公式计算：

当 $\frac{e_0}{r_c} \leq 1.55$ 时：

$$\varphi_e = \frac{1}{1 + 1.85 \frac{e_0}{r_c}} \quad (24)$$

当 $\frac{e_0}{r_c} > 1.55$ 时：

$$\varphi_e = \frac{1}{2.50 \frac{e_0}{r_c}} \quad (25)$$

式中： e_0 ——截面偏心距（mm）；

r_c ——钢管内混凝土横截面的半径（mm）。

7.2.6 钢管混凝土哑铃形截面和格构柱截面轴心抗压强度设计值 N_D 应按下列公式计算：

$$\gamma_0 N_s \leq N_D \quad (26)$$

$$N_D = \sum (N_0^i + N_f^i) \quad (27)$$

$$N_f^i = A_{fs} f_s \quad (28)$$

式中： N_D ——钢管混凝土哑铃形和格构柱构件截面轴心抗压强度设计值（N）；

N_0^i ——拱肋截面各肢钢管混凝土截面轴心抗压强度设计值（N），按本规范公式（18）计算；

N_f^i ——与钢管混凝土主肢共同承担荷载的连接钢板的极限承载力设计值（N）；

A_{fs} ——连接钢板的截面面积（mm²）。

7.2.7 钢管混凝土哑铃形构件和格构柱偏心抗压强度验算时，轴向压力组合设计值 N_s 应取截面轴向力最大设计值和对应于截面弯矩最大设计值的轴力值，并按下列公式计算：

$$\gamma_0 N_s \leq N_{D1} \quad (29)$$

$$N_{D1} = \varphi_e N_D \quad (30)$$

式中： φ_e ——偏心率折减系数，哑铃形构件按本规范第 5.2.8 条的规定计算，格构柱按本规范第 7.2.9 条的规定计算。

7.2.8 钢管混凝土哑铃形构件的偏心率折减系数 φ_e 应按下列公式计算：

当 $e_0/(2i) \leq 0.85$ 时：

$$\varphi_e = \frac{1}{1 + 2.82e_0/(2i)} \quad (31)$$

当 $e_0/(2i) > 0.85$ 时：

$$\varphi_e = \frac{0.25}{e_0/(2i)} \quad (32)$$

式中： e_0 ——哑铃形构件截面的偏心距（mm）。

7.2.9 钢管混凝土格构柱的偏心率折减系数 φ_e 应按下列公式计算：

当 $e_0/h_1 \leq \varepsilon_b$ 时：

$$\varphi_e = \frac{1}{1 + \frac{2e_0}{h_1}} \quad (33)$$

当 $e_0/h_1 > \varepsilon_b$ 时：

$$\varphi_e = \frac{\xi_0}{(1 + \sqrt{\xi_0} + \xi_0)(\frac{2e_0}{h_1} - 1)} \quad (34)$$

$$\varepsilon_b = 0.5 + \frac{\xi_0}{1 + \sqrt{\xi_0}} \quad (35)$$

式中： ε_b ——界限偏心率；

h_1 ——格构柱截面受弯面内两肢中心距离（mm）；

e_0 ——格构柱截面的偏心距（mm）。

7.2.10 钢管混凝土桁式拱肋腹杆所受轴力设计值 V_1 应取实际轴力或按下式计算结果取较大值：

$$V_1 = \sum_1^n N_{0i} / 60 \quad (36)$$

式中： V_1 ——腹杆所受轴力设计值（N）；

n ——桁式拱肋弦杆数；

N_{0i} ——桁式拱肋第 i 根弦杆轴心抗压强度设计值 (N)，按本规范公式 (18) 计算。

7.2.11 哑铃形与桁式拱肋除了弦杆钢管混凝土构件外，还应对腹板或腹杆、平联等其它拱肋组成构件和连接构造进行受力计算。

7.2.12 钢管混凝土节点和空钢管节点应按钢管节点进行节点连接承载力计算，并应符合现行国家标准《钢结构设计标准》GB 50017 的规定。

7.3 拱肋稳定计算

7.3.1 钢管混凝土拱桥应进行空间稳定性计算，弹性稳定特征值不应小于 4.0。当主拱跨径大于 300m 时，尚应计入材料非线性和几何非线性的影响。计算时拱肋截面整体压缩设计刚度和弯曲设计刚度应按本规范第 4.3.3 条的规定计算。

7.3.2 钢管混凝土拱肋的面内整体稳定承载力可将其等效成梁柱进行验算。单圆管拱肋、哑铃形拱肋和桁式拱肋可分别等效成单圆管构件、哑铃形构件和格构柱。等效梁柱的计算长度可按表 5 的规定计算，等效梁柱的两端作用力可取拱跨 $L/4$ 截面处的弯矩与轴力。

表 5 拱肋的等效计算长度

拱结构	等效计算长度 L_0
三铰拱	$0.58S_g$
双铰拱	$0.54S_g$
无铰拱	$0.36S_g$

注： S_g 为拱轴线长度。

7.3.3 钢管混凝土单圆管偏心受压构件稳定承载力设计值 N_{02} 应按下列公式计算：

$$\gamma_0 N_s \leq N_{02} \tag{37}$$

$$N_{02} = \varphi \varphi_e N_0 \tag{38}$$

式中： N_{02} ——钢管混凝土单圆管偏心受压构件稳定承载力设计值 (N)；

φ ——稳定系数，按本规范第 7.3.5 条的规定计算；

φ_e ——偏心率折减系数，按本规范第 7.2.5 条的规定计算。

7.3.4 钢管混凝土哑铃形构件和格构柱偏心受压稳定承载力设计值 N_{D1} 应按下列公式计算：

$$\gamma_0 N_s \leq N_{D1} \tag{39}$$

$$N_{D1} = \varphi \varphi_e N_D \quad (40)$$

式中：\$N_{D1}\$——钢管混凝土哑铃形构件和格构柱偏心受压稳定承载力设计值（N）；

\$\varphi_e\$——偏心率折减系数，哑铃形构件按本规范第 5.2.8 条的规定计算，格构柱按本规范第 7.2.9 条的规定计算。

7.3.5 稳定系数 \$\varphi\$ 应按下列公式计算：

当 \$\lambda_n \leq 1.5\$ 时：

$$\varphi = 0.658^{\lambda_n^2} \quad (41)$$

当 \$\lambda_n > 1.5\$ 时：

$$\varphi = \frac{0.877}{\lambda_n^2} \quad (42)$$

式中：\$\lambda_n\$——相对长细比，按本规范公式（5.3.6）计算。

7.3.6 钢管混凝土柱的相对长细比 \$\lambda_n\$ 应按下列公式计算：

$$\text{对单圆管和哑铃形柱：} \lambda_n = \frac{\lambda}{\pi} \sqrt{\frac{f_y A_s + f_{ck} A_c + A_c \sqrt{\rho_c f_y f_{ck}}}{E_s A_s + E_c A_c}} \quad (43)$$

$$\text{对格构柱：} \lambda_n = \frac{\lambda^*}{\pi} \sqrt{\frac{f_y A_s + f_{ck} A_c + A_c \sqrt{\rho_c f_y f_{ck}}}{E_s A_s + E_c A_c}} \quad (44)$$

式中：\$\lambda\$——钢管混凝土单圆管柱、哑铃形柱的名义长细比，分别按本规范第 7.3.7 和 7.3.8 条的规定计算；

\$\lambda^*\$——钢管混凝土格构柱的换算长细比，按本规范第 7.3.10 条的规定计算。

7.3.7 钢管混凝土单圆管柱的名义长细比 \$\lambda\$ 应按下列公式计算：

$$\lambda = 4l_0 / D \quad (45)$$

式中：\$l_0\$——计算长度；

\$D\$——钢管外径。

7.3.8 钢管混凝土哑铃形柱的名义长细比 \$\lambda\$ 应按下列公式计算：

$$\lambda = l_0 / i \quad (46)$$

7.3.9 钢管混凝土格构柱对 \$X\$ 轴和 \$Y\$ 轴的名义长细比 \$\lambda_x\$ 和 \$\lambda_y\$、单肢名义长细比 \$\lambda_1\$ 应按下列公式计算：

$$\lambda_x = \frac{l_{0x}}{\sqrt{\sum (I_{sc} + b_i^2 A_{sc}) / \sum A_{sc}}} \quad (47)$$

$$\lambda_y = \frac{l_{0y}}{\sqrt{\sum (I_{sc} + a_1^2 A_{sc}) / \sum A_{sc}}} \quad (48)$$

$$\lambda_1 = \frac{l_1}{\sqrt{I_{sc} / A_{sc}}} \quad (49)$$

$$A_{sc} = A_s + A_c \quad (50)$$

$$I_{sc} = \frac{\pi D^4}{64} \quad (51)$$

式中: λ_x, λ_y ——钢管混凝土格构柱对 X 轴和 Y 轴的名义长细比;

l_{0y}, l_{0x} ——钢管混凝土格构柱对 Y 轴、X 轴的计算长度;

λ_1 ——钢管混凝土格构柱单肢名义长细比;

A_{sc} ——单根柱肢的组合截面面积;

I_{sc} ——单根柱肢的组合截面惯性矩;

a_i, b_i ——单根柱肢中心到虚轴 $y-y$ 和 $x-x$ 的距离 ($i=1,2$) (图 2);

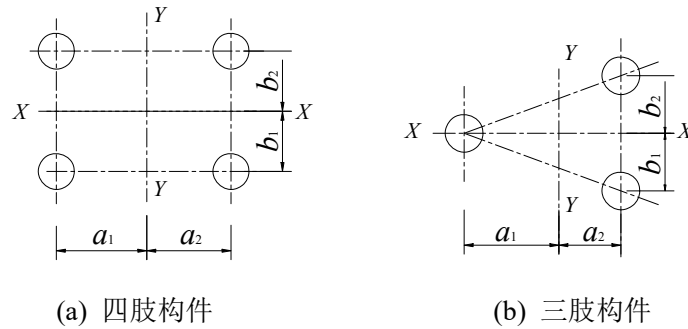


图 2 格构柱柱肢距离示意图

7.3.10 钢管混凝土格构柱的换算长细比 λ^* 应按下列公式计算:

$$\lambda^* = K' \lambda_y \text{ 或 } \lambda^* = K' \lambda_x \quad (52)$$

$$K' = \begin{cases} 1.1K & K\lambda \leq 40 \\ K \sqrt{1 + \frac{300}{(K\lambda)^2}} & K\lambda > 40 \end{cases} \quad (53)$$

$$K = \sqrt{1 + \mu} \quad (54)$$

$$\mu = \begin{cases} \frac{(E_s I_s + E_c I_c)}{l_1^2 \cdot (E_s A_d)} (2.83 + \frac{1}{A_b}) & \mu \leq 0.5 \\ 0.5 & \mu > 0.5 \end{cases} \quad (55)$$

$$A = A_s + \frac{E_c}{E_s} A_c \quad (56)$$

式中： λ^* ——换算长细比；
 K' ——换算长细比修正系数；
 K ——换算长细比系数；
 μ ——柔度系数；
 A ——柱肢截面换算面积；
 A_s, A_c ——分别为柱肢钢管横截面总面积和管内混凝土横截面总面积；
 A_d ——一个节间内各斜腹杆面积之和；
 A_b ——一个节间内各平腹杆面积之和；
 λ ——钢管混凝土格构柱的名义长细比（ λ_x 或 λ_y ）；
 l_1 ——格构柱柱肢节间距离。

7.3.11 对钢管混凝土轴压构件和偏心率 $\rho \leq 0.3$ 的偏压柱，其承受永久荷载引起的轴压力占全部轴压力的 30% 及以上时，截面轴心抗压强度设计值 N_0 应乘以混凝土徐变折减系数 k_c 。徐变折减系数 k_c 应按表 6 的规定取值，偏心率 ρ 应按下列公式计算：

$$\rho = \frac{e_0}{r} \quad (57)$$

$$r = 2i - t \quad (58)$$

$$r = 2i \quad (59)$$

式中： r ——截面计算半径，单圆管、哑铃形柱按公式（58）计算；格构柱按公式（59）计算；
 t ——钢管壁厚。

表 6 徐变折减系数 k_c

名义长细比 λ	永久荷载所占比例（%）
-----------------	-------------

	30	50	70 及以上
$40 \leq \lambda \leq 70$	0.90	0.85	0.80
$70 < \lambda \leq 120$	0.85	0.80	0.75

注：表中名义长细比 λ 应按本规范第 7.3.7~7.3.9 条的规定计算；表内中间值可采用线性内插法求得。

7.3.12 钢管混凝土拱稳定承载力计算中，计入初应力影响时，按本规范公式（18）计算的截面轴心抗压强度设计值 N_0 应乘以初应力度影响系数 K_p 。初应力度影响系数 K_p 应按下列公式计算：

$$K_p = 1 - 0.24 a m \beta \tag{60}$$

$$a = \lambda / 80 \tag{61}$$

$$\beta = \frac{\sigma_0}{f_y} \tag{62}$$

$$m = 0.2 \rho + 0.98 \tag{63}$$

式中： K_p ——考虑初应力度对钢管混凝土承载力的折减系数；

a ——考虑长细比影响的系数；

m ——考虑偏心率影响的系数；

β ——钢管初应力度；

λ ——构件的长细比，按本规范第 7.3.7~7.3.10 条的规定计算；

σ_0 ——钢管初应力，在截面上不均匀时，取截面平均应力；

f_y ——钢管强度标准值，取值应符合本规范表 1 的规定；

ρ ——构件偏心率；按本规范公式（57）计算。

7.4 吊索和系杆索计算

7.4.1 吊索和系杆索设计，宜按现行行业标准《公路斜拉桥设计规范》JTG/T 3365-01 中对斜拉索的技术要求执行。

7.4.2 吊索的应力应满足下式要求：

$$\sigma \leq 0.33 f_{tpk} \tag{64}$$

式中： σ ——吊索的应力（N/mm²）；

f_{tpk} ——吊索的抗拉强度标准值 (N/mm²)。

7.4.3 系杆索的应力应满足下式要求：

$$\sigma \leq 0.5f_{tpk} \tag{65}$$

式中： σ ——系杆索的应力 (N/mm²)；

f_{tpk} ——系杆索的抗拉强度标准值 (N/mm²)。

7.5 强健性设计计算

7.5.1 拱桥悬吊桥面系强健性设计计算流程见图 3。

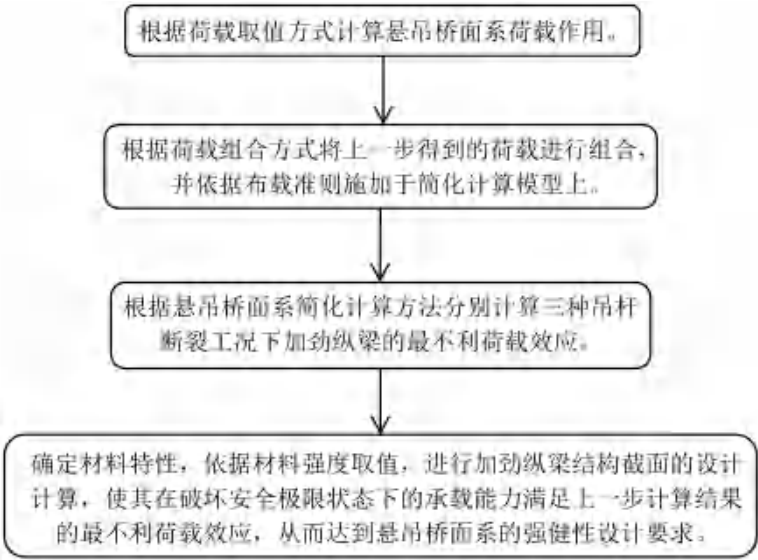
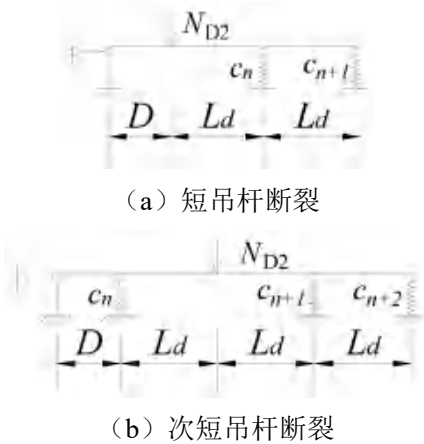
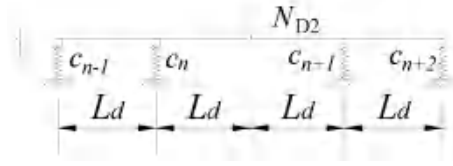


图 3 拱桥悬吊桥面系强健性设计计算流程

7.5.2 基于弹性支撑连续梁理论，将桥面系简化为弹性连续梁（图 4），通过对计算长度的折减，得到拱桥悬吊桥面系强健性设计简化计算方法，按下列公式计算：





(c) 长吊杆断裂

图4 悬吊桥面系简化计算模型

1 短吊杆断裂工况

$$M_n = \frac{\Delta_{n,p}}{\delta_{n,n}} \quad (66)$$

$$\delta_{n,n} = \frac{D+2L_d}{3E_{gs}I_g} + c_n \left(\frac{1}{L_d} + \frac{1}{L_d+D} \right)^2 \quad (67)$$

$$\Delta_{n,p} = \frac{1}{E_{gs}I_g} \left[\frac{N_{D2}DL_d[2D^2+L_d(3D+L_d)]}{6(L_d+D)^2} \right] - c_n R \left(\frac{1}{L_d} + \frac{1}{L_d+D} \right) \quad (68)$$

2 次短吊杆断裂工况

$$\begin{pmatrix} \delta_{n,n} & \delta_{n,n+1} \\ \delta_{n+1,n} & \delta_{n+1,n+1} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} M_n \\ M_{n+1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Delta_{n,p} \\ \Delta_{n+1,p} \end{pmatrix} \quad (69)$$

$$\delta_{n,n} = \frac{D+2L_d}{3E_{gs}I_g} + c_n \left(\frac{1}{2L_d} + \frac{1}{D} \right)^2 + c_{n+1} \left(\frac{1}{2L_d} \right)^2 \quad (70)$$

$$\delta_{n+1,n} = \delta_{n,n+1} = \frac{L_d}{3E_{gs}I_g} - \frac{c_n}{2L_d} \left(\frac{1}{2L_d} + \frac{1}{D} \right) - \frac{3c_{n+1}}{4L_d^2} \quad (71)$$

$$\delta_{n+1,n+1} = \frac{L_d}{E_{gs}I_g} + \frac{c_n}{4L_d^2} + \frac{9c_{n+1}}{4L_d^2} + \frac{c_{n+2}}{L_d^2} \quad (72)$$

$$\Delta_{n,p} = \frac{N_{D2}L_d^2}{4E_{gs}I_g} - c_n R_n \left(\frac{1}{2L_d} + \frac{1}{D} \right) + \frac{c_{n+1}R_{n+1}}{2L_d} \quad (73)$$

$$\Delta_{n+1,p} = \frac{N_{D2}L_d^2}{4E_{gs}I_g} + \frac{c_n R_n}{2L_d} - \frac{3c_{n+1}R_{n+1}}{2L_d} \quad (74)$$

3 长吊杆断裂工况

$$\begin{pmatrix} \delta_{n,n} & \delta_{n,n+1} \\ \delta_{n+1,n} & \delta_{n+1,n+1} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} M_n \\ M_{n+1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Delta_{n,p} \\ \Delta_{n+1,p} \end{pmatrix} \quad (75)$$

$$\delta_{n,n} = \frac{L_d}{E_{gs}I_g} + \frac{4c_{n-1} + 9c_n + c_{n+1}}{4L_d^2} \quad (76)$$

$$\delta_{n+1,n} = \delta_{n,n+1} = \frac{L_d}{3E_{gs}I_g} - \frac{3}{4L_d^2} (c_n + c_{n+1}) \quad (77)$$

$$\delta_{n+1,n+1} = \frac{L_d}{E_{gs}I_g} + \frac{c_n + 9c_{n+1} + 4c_{n+2}}{4L_d^2} \quad (78)$$

$$\Delta_{n,p} = \frac{N_{D2}L_d^2}{4E_{gs}I_g} - \frac{3c_n R_n - c_{n+1} R_{n+1}}{2L_d} \quad (79)$$

$$\Delta_{n+1,p} = \frac{N_{D2}L_d^2}{4E_{gs}I_g} + \frac{c_n R_n - 3c_{n+1} R_{n+1}}{2L_d} \quad (80)$$

式中： $\delta_{n,n}$ ——力法基本结构中吊杆 n 处作用 $M_n=1$ 引起的吊杆 n 两侧梁的相对转角；

$\Delta_{n,p}$ ——力法基本结构中由外荷载作用引起的吊杆 n 两侧梁的相对转角；

C_n ——断裂吊杆 n 的柔度系数；

R_n ——外荷载作用在基本结构上引起的吊杆 n 处对应的支承反力；

N_{D2} ——考虑吊杆断裂冲击的吊杆作用力；

L_d ——吊杆之间的距离；

D ——断裂的边吊杆和加劲纵梁端点之间的距离；

E_{gs} ——加劲纵梁的弹性模量；

I_g ——加劲纵梁的截面惯性矩；

L_n ——吊杆 n 的长度；

E_n ——吊杆 n 的弹性模量；

A_n ——吊杆 n 的截面积。

8 持久状况正常使用极限状态计算

8.0.1 钢管混凝土拱桥的持久状况设计应按正常使用极限状态的要求，采用荷载的短期效应组合、长期效应组合或短期效应组合并计入长期效应组合的影响，对构件的应力、挠度进行验算，各项计算值不应超过本规范规定的各相应限值。各种组合中，汽车荷载效应可不计冲击系数。

8.0.2 钢管混凝土拱肋应设置预拱度，计算预拱度应为恒载累计变形、钢管混凝土徐变挠度和 1/2 活载挠度之和；预拱度计入非线性影响后，可按式(81)进行计算。对于主拱跨径小于 50m 的拱桥，主拱预拱度宜设置在计算跨径的 1/400~1/600 范围内。

$$\delta_s = K_y \delta_j \quad (81)$$

式中： δ_s ——主拱设计预拱度值（m）；

δ_j ——主拱计算预拱度值（m）；

K_y ——预拱度非线性修正系数，主跨 50~100m，取 1.05；主跨 100~150m，取 1.11；主跨 150~220m，

取 1.16；主跨 220~340m，取 1.20；主跨大于 340m，取 1.25。

8.0.3 钢管混凝土结构或构件变形计算中，混凝土徐变系数在无可靠实测资料时可按现行行业标准《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG 3362 的规定计算。

8.0.4 钢管混凝土拱肋的挠度计算，按短期效应组合并消除结构自重产生的长期挠度后，在一个桥跨范围的正负挠度绝对值之和的最大值不应大于计算跨径的 1/1000；桥面梁（板）的最大竖向挠度不应大于计算跨径的 1/800。

8.0.5 持久状况下钢管混凝土拱肋的钢管应力不宜大于 $0.8f_y$ 。

9 总体设计及构造

9.1 结构形式

9.1.1 应根据桥位地形、地质、水文条件和使用要求，合理选择钢管混凝土拱桥结构体系，具体结构体系详见《钢管混凝土拱桥技术规范》GB 50923。

9.1.2 主拱矢跨比取值范围宜为：上承式 $1/4\sim 1/6$ ，中承式 $1/3.5\sim 1/5$ ，下承式 $1/4.5\sim 1/5.5$ 。

9.1.3 钢管混凝土中承式刚架系杆拱桥，边跨与中跨跨径之比宜为 $1/4.0\sim 1/5.5$ ，边跨拱肋与中跨拱肋的矢高之比宜为 $1/3.5\sim 1/4.5$ ，边跨拱肋矢跨比与中跨拱肋矢跨比之比宜为 $1/1.1\sim 1/2.0$ 。

9.1.4 多跨钢管混凝土拱桥宜设置单向推力墩或采用其他抗单向推力措施。单向推力墩宜每隔三跨至五跨设置一个。下承式多跨连续刚架系杆拱的系杆宜各跨独立锚固。

9.2 主拱

9.2.1 钢管混凝土拱肋的截面形式应根据跨径、桥宽与车辆荷载等级等进行选择。截面形式可采用单圆管、哑铃形和桁式。采用单管主拱的拱桥，其跨径不宜大于 80m；采用哑铃形截面的拱桥，跨径不宜大于 150m；跨径大于 150m，宜采用桁式主拱；跨径大于 300m，宜采用变截面桁式主拱。

9.2.2 对跨径不大于 300m、采用哑铃形或四肢桁式等高度截面的钢管混凝土拱桥，拱肋截面高度 H 可按式估算，且四肢桁式拱肋的宽度可采用 $0.40H\sim 0.75H$ 。变高度截面的桁拱，拱顶和拱脚截面高度可分别按下式计算值的 0.9 倍和 1.4 倍 \sim 1.6 倍取用：

$$H = k_1 k_2 \left[0.2 \left(\frac{l_{01}}{100} \right)^2 + \frac{l_{01}}{100} + 1.2 \right] \quad (82)$$

式中： H ——拱肋截面高度（m）；

l_{01} ——拱肋净跨径（m）；

k_1 ——荷载系数，公路 I 级或城—A 级取 1.0，公路 II 级或城—B 级取 0.9；

k_2 ——行车道系数，当设计车道为 2 或 3 时取 0.9；当设计车道为 4 时取 1.0；当设计车道为 6 时取 1.1。

9.2.3 钢管混凝土拱的拱轴线应根据桥梁跨径和受力情况选择，宜为抛物线或拱轴系数为 $1.2\sim 2.8$ 的悬链线。当采用悬链线时，其拱轴系数 m 对上承式宜为 $1.2\sim 2.8$ ，对中承式不宜大于 1.9，对下承式不宜大于 1.5。

9.2.4 钢管混凝土拱肋钢管外径宜为 600mm \sim 1500mm。哑铃形截面的弦管管径可采用 $0.35H\sim 0.46H$ 。

等高度桁式截面的拱肋弦管直径可采用 $0.18H \sim 0.30H$ ，随拱肋高度的增大可取用低值。

9.2.5 哑铃形截面中两块腹板间应设置加劲构造。加劲构造间沿拱肋方向的距离 l_2 不应大于 3 倍的腹板高度 h_2 （图 5）。

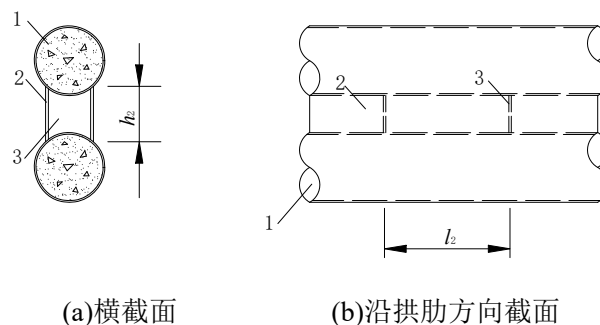


图 5 哑铃形截面拱肋腹板加劲构造示意图

1—弦管；2—腹板；3—加劲构造

9.2.6 横哑铃桁式截面中两块平联板间应采用加劲板等构造措施。当无斜杆时，两根平联杆间的距离宜为平联长度的 1.5~3.0 倍。

9.2.7 桁式拱肋的吊杆或立柱宜设置在弦杆与腹杆的节点处。拱肋在吊杆、立柱等截面处，应进行局部加劲。

9.2.8 提篮拱的拱肋内倾角宜为 $5^\circ \sim 10^\circ$ 。

9.2.9 拱肋横撑（风撑）可采用空钢管结构。

9.2.10 钢管混凝土拱桥管结构中主管与支管应满足构造要求。支管钢管与主管钢管直径比宜为 0.40~0.60，壁厚比宜为 0.55~1.00，支管与主管的面积比不宜小于 0.25。桁式拱肋的主管（钢管混凝土弦杆）可在节点处设置内栓钉。

9.2.11 钢管混凝土拱桥管结构的节点构造应符合《钢管混凝土拱桥技术规范》GB 50923 相关规定。

9.2.12 对分段安装的拱肋，各拱段接头间应设置临时定位设施。当拱肋钢管对接或合龙采用焊接连接时，应采取措施保证焊缝的质量；对节段间的临时连接，可采用法兰盘配螺栓连接或其他可靠方式连接。当采用内法兰盘连接时，法兰盘构造应具有使管内混凝土连成一体的通透性。

9.2.13 钢管混凝土拱肋施工时应在空管阶段完成合龙。合龙口宜选在结构对称处。对无支架施工的大跨径拱肋宜采用瞬时合龙。

9.2.14 钢管混凝土拱肋固结于拱座的构造应采用埋入式，埋入长度应满足锚固要求。对单圆管或哑铃形拱肋，埋入长度应大于 1 倍的拱肋高度。对桁式拱肋，受压弦杆埋入拱座的长度应大于弦杆管径的 1 倍，对受拉弦杆其埋入长度应根据计算确定；当拉力超出设计限值时，可通过在钢管表面设置剪力

钉或其他刚性剪力连接件增强其锚固能力。

9.2.15 钢管混凝土拱肋应设置灌注管内混凝土的构造，并应采取相应的补强措施。

9.3 拱座与立柱

9.3.1 拱座宜为钢筋混凝土结构。拱座构造应能满足拱肋的固结要求，并应有足够的强度与抗裂性能。可在拱脚埋入段的钢管外缘设置螺旋箍筋，在拱座内拱脚截面下宜设置 2~4 层分布钢筋网。

9.3.2 立柱与钢管混凝土拱肋间宜设置柱脚。

9.4 吊索和系杆索

9.4.1 钢管混凝土拱桥的吊索与系杆索必须具有可检查、可更换的构造与措施。

9.4.2 吊索与系杆索的设计应满足施工时的安装与张拉空间的要求，并应对使用时检查、养护和换索进行设计。

9.4.3 吊索的上下端锚具宜露出结构外。当锚具设置于结构内时，应满足锚具的安装空间和检查与养护的要求。吊索和系杆索应具有防水、排水措施，桥面处吊索预埋管上端应伸出桥面结构 100mm~150mm，伸出口应封闭。

9.4.4 吊索锚具应满足抗疲劳性能要求；吊索上下端的预留孔道宜填充防腐材料。外露的锚具应设防护罩，防护罩内宜注入油脂或其它防护材料进行封锚处理。

9.4.5 系杆索宜选用具有热挤 PE 保护层的预应力钢绞线或平行钢丝索。钢绞线系杆索可采用环氧喷涂钢绞线或镀锌成品索体。

9.4.6 系杆索锚具根据系杆长度可采用冷铸锚。当系杆索锚具采用夹片锚时，应有防止失锚装置。

9.4.7 系杆索可采用系杆箱防护。系杆箱应具有防水、排水性能，并应设检查口。系杆索的预埋管应伸出结构 150mm~200mm。外露的系杆索锚具应设置防护罩。

9.4.8 吊索与系杆索锚固处应有可扩散局部集中应力、且将吊索与系杆索索力传给受力结构的构造措施。吊索与系杆索不宜穿过主拱等主要受力结构。当无法避免时，应采取保证主拱受力性能的补强措施。

9.5 桥面系

9.5.1 中承式和下承式拱桥的悬吊桥面系应采用整体性结构，以横梁受力为主的悬吊桥面系必须设置加劲纵梁，并应进行强健性设计，详见 7.5 节。

9.5.2 中承式和下承式拱的悬吊桥面系宜在拱梁相交处设置横向限位装置。不承受水平拉力的悬吊桥面系的加劲纵梁不应与其端部结构或主拱固接。

9.5.3 中承式拱桥面系肋间横梁的设置不应影响主拱结构的连续性。桥面系与拱肋之间的结构设计应防止因变形不同引起的结构损伤。

9.5.4 悬吊桥面系的桥面板与横梁之间，在桥面伸缩装置附近可设置支座，其余不宜设置支座。伸缩缝附近的小支座应具有可更换条件，且宜采取限位或固定等防止脱落的措施。

10 附属构造

10.1 防排水构造

10.1.1 防排水构造应在主体结构设计时综合设计，局部构造细节不得影响结构的可维护性和耐久性，并应符合环保相关规范要求。

10.1.2 主体结构上易于积水处应设置相应的泄水孔，其孔径不应小于 50mm。

10.1.3 当桥面排水采用直排水时，出口排水不得腐蚀和污染钢结构。当采用汇集式时，泄水管孔径及数量应根据桥面汇水面积确定，排水口应设置于主体结构之外。汇集式的集水管与主体结构的连接，应适应桥面梁、主拱的变形需要。跨越桥梁伸缩缝的集水管应设置伸缩装置。

10.2 检修养护措施

10.2.1 检修通道的设置应满足主拱、横撑、吊索锚头、桥面纵横梁和拱梁交叉处的检测和维修需要。桥面梁宜设计专用检修车。

10.2.2 检修通道钢构件的焊接工艺与质量控制应与主体结构的要求相同。

10.2.3 在设计阶段应根据构造特点提出桥梁检查、养护、维修的技术要求。

11 防腐构造与涂装

11.0.1 钢管混凝土拱桥中的钢构件，应针对桥址大气腐蚀环境和涂层体系保护年限，按现行《公路桥梁钢结构防腐涂装技术条件》JT/T 722 的规定，进行防腐涂装。

11.0.2 根据结构防腐蚀重点、工艺要求，应避免出现易于积水集污的死角、未封闭焊缝及难以实施涂装施工的不良细节。

钢管混凝土拱桥设计技术规程

编制说明

一、工作简况

1.1 任务来源

本标准的编制任务来自于山东公路学会《关于发布第一批山东公路学会标准立项计划的通知》（鲁公学会[2023]6号）。

1.2 编制背景

世界上最早修建的钢管混凝土拱桥在前苏联地区，但是在桥梁工程建设中得到广泛应用却是在中国。1990年，我国第一座钢管混凝土拱桥——四川旺苍大桥的建成，它是我国桥梁工作者在拱桥技术方面又一次努力的结果，也是我国对钢管混凝土结构理论与实际应用上的新的突破。钢管混凝土在拱桥上的应用，同时解决了高强度材料应用和施工两大难题，又恰逢我国大规模的基础设施建设时期，因此，钢管混凝土拱桥在我国得到迅速的发展。据不完全统计，截止到2023年，已建和在建的跨径不小于50m的钢管混凝土拱桥已近500座。钢管混凝土拱桥在短短的几十年内在中国得到如此迅速的发展，无论是在世界桥梁史上还是在中国桥梁史上都是一个十分特殊的现象。

伴随着钢管混凝土拱桥在我国的大量应用与经验积累，有关钢管混凝土拱桥的科学研究也在不断深入，设计计算理论基本体系已经形成。参编单位福州大学于2011年编制了福建省地方建设标准《钢管混凝土拱桥技术规程》（DBJ/T 13-136-2011），2013年完成了国家标准《钢管混凝土拱桥技术规程》（GB 50923-2013）的编制工作，四川省交通运输厅公路规划勘察设计研究院在2015年编制了交通运输部行业标准《公路钢管混凝土拱桥设计规范》（JTG-T D65-06-2015），为钢管混凝土拱桥的设计与建设提供了理论依据和技术支撑。

我国目前仍处于交通基础设施建议的高峰时期，钢管混凝土拱桥具有广阔的应用前景。随着社会和经济的发展，一些新材料（如Q420钢材）已逐渐应用到工程实际中，然而，由于上述几本钢管混凝土拱桥设计规范颁布已近十年，一些新材料的设计指标并未体现，无法指导钢管混凝土拱桥的设计；此外，由于受当时研究和应用的限制，已有规范也未对钢管混凝土拱桥结构脱空计算方法、悬吊桥面系强健性设计方法等做出明确的规定，因此，有必要开展钢管混凝土拱桥的制订工作，从而为增强钢

管混凝土拱桥结构计算分析的科学性、提高建设质量、降低工程造价提供理论指导。总之，钢管混凝土拱桥设计规范的制订，必将促进山东省钢管混凝土拱桥的推广应用与技术进步，提高经济效益和社会效益，具有重大的理论意义与工程意义。

1.3 起草过程

2023年3月6日标准计划下达后，于2023年3月上旬成立了由山东高速高商公路有限公司、山东省交通规划设计院集团有限公司、福州大学、山东省公路桥梁建设集团有限公司等单位共同参与标准制定的标准起草组，起草组讨论了工作进度安排、任务分工及标准的初步思路，正式启动标准制定工作。

2023年3月-2023年8月，编写组结合现阶段钢管混凝土拱桥设计和施工中的关键技术进行深入分析和研究，完成已有标准、文献资料的收集、分析和总结，并结合依托工程，开展了室内模型试验，有限元参数分析，计算方法提炼总结等工作。

2023年9月-2023年12月，标准编写小组开始草案编制工作，针对钢管混凝土拱桥设计及施工技术规范的范围、术语和定义、材料、设计计算、结构构造等内容进行了详细编制。结合钢管混凝土拱桥相关研究成果，工程应用情况，经过内部多次讨论，于2024年4月完成了标准初稿编制工作。

本规范主要包括两大部分：第一部分为通用部分，包括总则、术语和符号、材料等内容；第二部分为钢管混凝土拱桥设计部分：包括基本规定、持久状况承载能力极限状态计算、持久状况正常使用极限状态计算、施工阶段计算、结构与构造、耐久性设计、强健性设计等内容。

与现有规范（国家标准《钢管混凝土拱桥技术规程》（GB 50923-2013）、交通部行业标准《公路钢管混凝土拱桥设计规范》（JTG-T D65-06-2015）相比，本设计规范的主要特点如下所示：

1、更新相应新材料的设计指标，如Q420钢材，以及Q420钢材与管内混凝土等级的匹配度。

2、新增了钢管混凝土拱桥脱空系数计算方法内容。在依托工程相关课题研究支持下，通过试验和有限元模拟分析，进行基于实桥拱肋尺寸的大管径圆钢管混凝土（CCFST）柱的脱空折减系数计算公式研究，提出了适合于大管径的钢管混凝土拱桥脱空系数计算公式。

3、新增了钢管混凝土拱桥悬吊桥面系强健性设计内容。在依托工程相关课题《多跨连续下承式刚架系杆拱桥设计与施工关键技术》，以及国家自然科学基金项目《中、下承式拱桥悬吊桥面系强健性设计理论与计算方法研究》（51678154）支持下，掌握荷载、吊索、桥面系结构与构造等参数对悬吊桥面系的强健性性能影响规律，开展了强健性构造与纵、横梁节点受力性能以及悬吊桥面系强健性分析研究，建立了中、下承式拱桥悬吊桥面系强健性设计与计算方法。

二、主要技术内容及其确定依据

2.1 标准主要内容

为满足山东省桥梁工程建设的需要，使钢管混凝土拱桥的设计工作符合技术先进、安全可靠、耐久适用、经济合理的要求，特制定本规范。本规范主要包括两大部分：第一部分为通用部分，包括总则、术语和符号、材料等内容；第二部分为钢管混凝土拱桥设计部分：包括基本规定、持久状况承载能力极限状态计算、持久状况正常使用极限状态计算、施工阶段计算、结构与构造、耐久性设计、强健性设计等内容。

2.2 适用范围

本规范适用于山东省各级公路与市政工程钢管混凝土拱桥的设计。本规范所指的钢管混凝土拱桥是指以圆形钢管内浇筑混凝土为拱肋、以钢管混凝土拱肋为主要承重构件的拱桥。

2.3 章节框架和主要内容

- 1、范围：进行本规范编制目的、适用范围和与国家现行标准的关系的描述。
- 2、规范性引用文件：进行本规范编制所参考的标准。
- 3、术语和定义：对钢管混凝土拱桥的结构体系、构造、设计计算参数等术语和定义进行了规定。
- 4、符号：对钢管混凝土拱桥的结构体系、构造、设计计算参数等符号进行了规定。
- 5、材料：对钢材的强度与物理性能指标、混凝土的强度和弹性模量和钢管混凝土的材料等级匹配与套箍系数进行了规定。
- 6、设计的基本规定：对钢管混凝土拱桥设计的一般规定、作用和结构计算等方面进行了阐述。
- 7、持久状况承载力极限状态计算：对钢管混凝土拱桥关于拱肋构件、拱肋整体结构、吊杆与系杆的持久状况承载力极限状态设计计算进行了规定。
- 8、持久状况正常使用极限状态计算：对钢管混凝土拱桥构件的应力、挠度、舒适度等持久状况正常使用极限状态设计计算进行了规定。
- 9、总体设计及构造：对钢管混凝土拱桥的结构型式、主拱、拱座与立柱、吊杆与系杆、桥道系等方面给出了建议。
- 10、附属构造：对钢管混凝土拱桥的防排水构造、检修养护措施给出了建议。
- 11、防腐构造与涂装：对钢管混凝土拱桥防腐构造设计、工艺设计等给出建议。

三、试验验证的分析和综述报告

3.1 钢管混凝土拱桥材料设计指标（本规程条文 5.1.3、5.2.2 节）

近年来，大跨径钢管混凝土拱桥中使用的钢材和混凝土材料强度等级有所提高，如项目依托工程在建的高商黄河特大桥，拱肋采用了 Q420 钢材，内填 C60 级混凝土，拱座采用了 C80 级混凝土，结合规范《公路钢结构桥梁设计规范》(JTG D64-2015) 和《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG 3362-2018)，更新相应新材料的设计指标，如 Q420 钢材，以及 Q420 钢材与管内混凝土等级的匹配度。

3.2 钢管混凝土拱桥脱空系数取值（本规程条文 7.2.3 节）

现行钢管混凝土（CFST）拱桥规范已考虑核心混凝土脱空对承载力的影响，然而实际工程拱肋脱空程度有可能超过规范规定的限值，无法精准分析具有脱空缺陷的 CFST 拱肋承载力。借助通用有限元软件开展大管径脱空 CCFST 柱参数分析，并提出脱空折减系数计算公式，建立了工程的 CFST 拱桥空间杆系有限元模型，并将脱空折减系数计算公式应用于拱肋承载力分析。结果表明：球冠型脱空和月牙型脱空的核心混凝土分别采用双受压本构与单受压本构时，可较准确地模拟相关构件的基本受力性能；随着脱空率 x 或脱空角度率 R_d 的增大，球冠型脱空折减系数 K_d 或月牙型脱空折减系数 K_t 均呈不断减小的趋势；当 x 或 R_d 不变时， K_d 或 K_t 随混凝土强度等级和构件长细比的增大而增大，随着钢材强度等级和钢管壁厚的增大而减小，偏心率的影响较小；基于参数分析结果提出的脱空折减系数计算公式可用于超出现行规范脱空限值的 CFST 拱桥拱肋承载力分析，且计算结果偏于安全。

3.3 悬吊桥面系强健性设计计算（本规程条文第 7.5 章）

为简化吊杆断裂后中、下承式拱桥剩余结构动力响应的计算方法，提出了悬吊桥面系强健性设计破坏安全极限状态，通过开展大比例缩尺模型试验，采用 ANSYS/LS-DYNA 建立了不考虑拱肋的悬吊桥面系结构有限元模型，提出了弹性支撑悬吊桥面系简化计算模型，并采用五弯矩普通方程式，对弹性支撑悬吊桥面系计算长度进行简化，推导得到了悬吊桥面系简化计算方法。

构建 18 种不同跨径标准拱桥的分析结果验证了简化计算方法精度。研究结果表明：破坏安全极限状态恒载 γG 和活载 γQ 分项系数分别为 1.2 和 0.9，1 车道、2 车道、3 车道及以上的荷载横向分布系数分别取 1.0、0.75 和 0.52，钢筋和钢结构强度分别取 1.25 倍和 1.05 屈服强度、其他材料强度取标准值；不考虑拱肋的悬吊桥面系结构有限元简化计算模型最大正误差仅为 11.7%。

短吊杆、次短吊杆以及长吊杆断裂工况下弹性支撑连续梁模型计算长度分别取 $D+2L$ 、 $D+3L$ 和 $4L$ ，其偏差率分别为 2.89%、2.40%、3.66%。吊杆断裂破坏安全极限状态下中、下承式拱桥悬吊桥面系简化计算方法的正误差分别为 11.4% 和 10.1%，计算结果具有良好的精度且偏于安全。

四、技术经济论证

钢管混凝土拱桥在我国有着广阔的应用前景。因此，在对我国目前钢管混凝土拱桥设计的研究成果进行系统总结的基础上制定本规范，将对提高钢管混凝土拱桥结构计算分析的科学性、降低工程造价、提高结构安全性、延长桥梁使用寿命等方面都具有重大的理论指导意义；本规范的制定还将进一步对促进钢管混凝土拱桥的技术进步，推动钢管混凝土拱桥的设计理论的深入、促进山东省桥梁工程建设与提高投资效益起到积极的作用，其研究成果的运用将具有较大的经济效益和社会效益。

五、与国家标准、行业标准、地方标准同类标准技术内容的对比情况

本规范将在既有钢管混凝土拱桥设计规范的基础上，如国家标准《钢管混凝土拱桥技术规程》（GB 50923-2013）、交通部行业标准《公路钢管混凝土拱桥设计规范》（JTG-T D65-06-2015），更新相应新材料的设计指标，补充钢管混凝土拱桥拱肋结构脱空计算以及悬吊桥面系强健性设计方法等最新的研究成果，为现代钢管混凝土拱桥的设计与建设提供了理论依据和技术支撑。

本规范是在吸收现有钢管混凝土拱桥设计规范（包括国家标准《钢管混凝土拱桥技术规程》（GB 50923-2013）和交通部行业标准《公路钢管混凝土拱桥设计规范》（JTG-T D65-06-2015）的相关设计技术规定，应用了最新的研究成果，如依托工程相关研究课题《多跨连续下承式刚架系杆拱桥设计与施工关键技术》，以及国家自然科学基金面上项目《中、下承式拱桥悬吊桥面系强健性设计理论与计算方法研究》（51678154），形成了钢管混凝土拱桥结构脱空计算，以及悬吊桥面系强健性设计方法，从而为增强钢管混凝土拱桥结构计算分析的科学性、提高建设质量、降低工程造价提供理论指导。

六、重大分歧意见的处理经过和依据

编制期间，山东高速建设管理集团有限公司、山东高速高商公路有限公司、山东省交通规划设计院集团有限公司、福州大学组、山东省公路桥梁建设集团有限公司建了编写组，编写组建立了专题例会与节点性全员会议制度，针对编制过程中的技术路线及其参数等进行充分沟通，也针对编制过程中遇到的问题进行了多次内部讨论、协商，未有重大分歧意见。

七、涉及专利的有关说明

本标准不涉及专利情况。