

DOI:10.16799/j.cnki.csdqyfh.2024.07.020

# 高速铁路钢管混凝土简支拱桥设计分析

陈大鹏

(中国铁路设计集团有限公司,天津市 300000)

**摘要:** 钢管混凝土简支拱桥在高速铁路工程中运用广泛,已经成为最常用的“特殊”结构。钢管混凝土简支拱桥的设计相对于简支梁桥和连续梁桥有其独特的特点,为此从结构尺寸、设计荷载和设计指标及设计要点等方面总结了该类桥梁的设计问题,可为该类桥型的设计和发展提供借鉴和指导。

**关键词:** 高速铁路;钢管混凝土;简支拱;设计要点

中图分类号: U442.5

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2024)07-0078-06

## 0 引言

2000年以来高速铁路在我国发展迅速,已建成通车的高速铁路超过4万km,且仍在如火如荼地建设。简支拱桥在做到大跨度的同时,梁高又相对较薄,能够给桥下道路提供更高的净空,同时桥型较为美观,因此在高速铁路设计中得到了广泛应用。

80m跨度(支座中心线顺桥向距离)的简支拱桥在京沈高铁、潍莱高铁、济青高铁等重要项目中均有设计,本文以80m跨度的简支拱桥为例,对该类桥型的设计进行分析总结,较为详细地介绍了构件尺寸拟定、荷载选择和主要的计算方法等,为该类桥型的设计和发展提供借鉴。

## 1 总体布置

高速铁路钢管混凝土简支拱桥采用下承式布置,系梁采用箱梁形式,全长82.5m,计算跨度为80m。矢跨比 $f/L=1:5^{[1]}$ ,拱肋立面投影矢高16m,拱肋采用2次抛物线。拱肋在横桥向内倾 $8^\circ$ ,形成提篮式样,拱顶处两拱肋中心距12.046m。共采用13对吊杆,吊杆纵向间距5m。

简支拱桥立面图、横断面图见图1、图2。

### 1.1 系梁设计

系梁采用预应力混凝土箱梁结构。

#### 1.1.1 结构尺寸

系梁的高度随着跨度变化而不同。一般系梁高

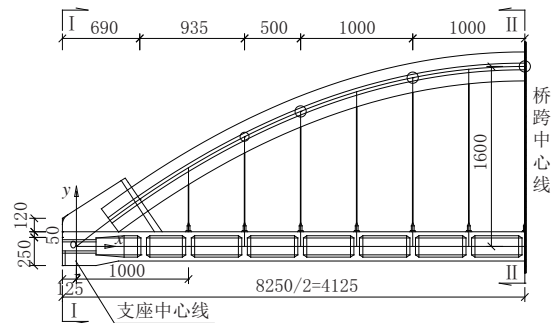


图1 简支拱桥立面图(单位:cm)

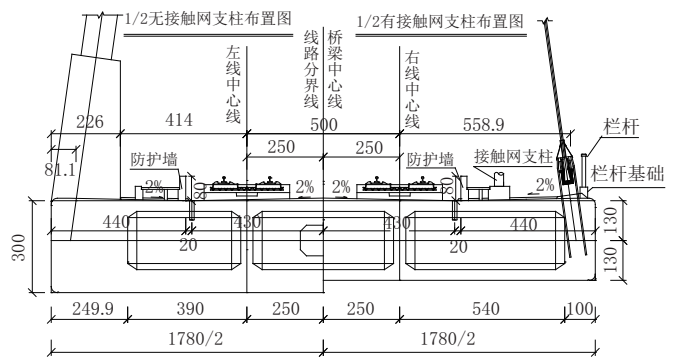


图2 简支拱桥横断面图(单位:cm)

度为2.6m左右,拱脚部位由于结构连接复杂、预埋件多而增加到3m。梁面宽度受到拱脚宽度的影响,在一般简支梁通用图梁宽12.6m的基础上增加了拱脚宽度(横向两侧各2.5m)。本设计梁宽为17.8m,采用单箱3室结构,梁端封闭,中心留 $1\text{m}\times 1\text{m}$ 方形过人孔,中横隔板设过人孔,底板设泄水孔。梁部全长82.5m,梁高2.6m,梁端加高至3.0m;顶板厚0.35m,底板厚0.35m,边腹板厚1.0m,中腹板厚0.4m;中横隔厚0.5m,端横隔厚3.0m。材料采用C50混凝土。

系梁截面见图3。

收稿日期: 2023-03-08

作者简介: 陈大鹏(1990—),男,硕士,工程师,从事桥梁设计与研究工作。

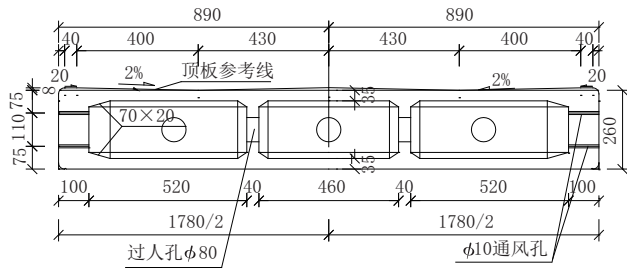


图3 系梁截面(单位:cm)

### 1.1.2 预应力布置

由于拱桥拱肋承担很大部分荷载,系梁预应力布置不同于简支梁,其截面上下均布置预应力,上部预应力数量比下部少一些。一般截面预应力布置示意图见图4。

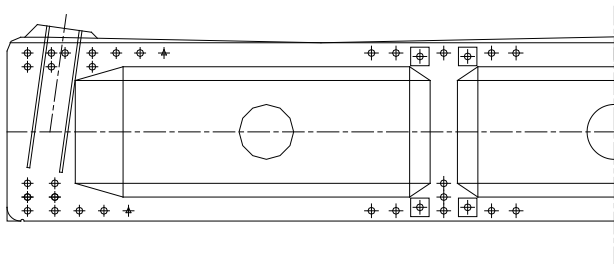


图4 一般截面预应力布置示意图

## 1.2 拱肋设计

拱肋采用钢管混凝土拱肋。

### 1.2.1 拱肋截面

拱肋横断面采用哑铃型,截面高度为2.6 m,钢管直径为1.0 m,由厚度为16 mm的钢板卷制而成,每根拱肋的两钢管之间用厚度为16 mm的腹板连接。每隔一段距离,在圆形钢管内设加劲箍,在两腹板中焊接拉杆。拱管内灌注C50补偿收缩混凝土。

拱肋截面见图5。

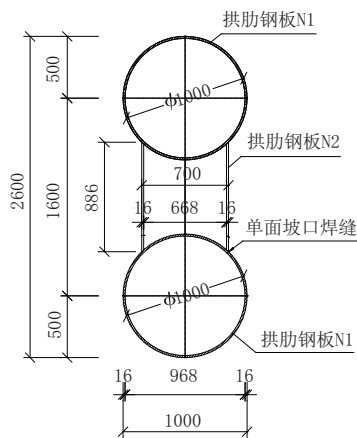


图5 拱肋截面(单位:cm)

### 1.2.2 拱肋线形

拱肋线形一般采用抛物线或者悬链线的形式,矢高一般采用跨度的1/5左右。抛物线线形比较简单,本桥拱肋平面内采用抛物线的形式,其线形公

式为:

$$y = 4 \times 16.157 \times (80-x)x/80^2 \quad (1)$$

为减小整桥振动频率,避免车桥耦合情况,钢管拱肋呈八字形布置,向内倾一定角度。拱肋之间设置K型横撑钢管连接,以保证横向稳定性。

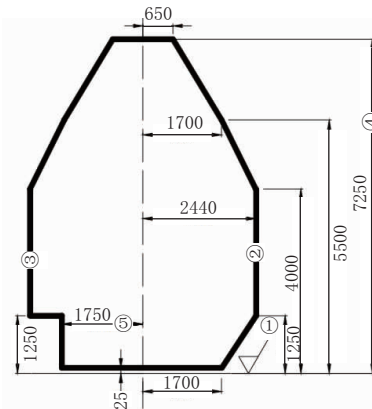
## 1.3 吊杆设计

吊杆采用平行钢丝成品索,根据破断力选择型号,保证安全系数大于3。本桥选择吊杆型号为PES(FD)7-121成品索,抗拉强度标准值为1670 MPa,破断力7777 kN,疲劳应力幅200 MPa;钢丝按GB 5223标准执行,采用双层高密度聚乙烯(HDPE)护层,并外套不锈钢护套。计算最小安全系数为3.2。

## 1.4 限界

### 1.4.1 建筑限界

高速铁路上所有结构都应满足建筑限界要求<sup>[2]</sup>。高速铁路建筑限界图见图6。



①—轨面;②—区间及站内正线(无站台)建筑限界;③—有站台时建筑限界;④—轨面以上最大高度;⑤—线路中心线至站台边缘的距离(正线不适用)。

图6 高速铁路建筑限界图(单位:mm)

本桥拱肋呈八字形布置,且2片拱肋之间设置K形支撑,需要检算拱肋、吊杆和K形支撑是否侵入限界。

本桥简支拱行车工况限界检算图见图7。由图7可知,本桥设计拱肋、横撑、吊索等特殊结构均满足建筑限界要求。

### 1.4.2 施工期间限界

根据施工期间是否需要通过运梁车,也需要进行施工期间的净空检算。

运营和施工期间的结构限界关系见图8。由图8可知,本桥简支拱运梁工况下,拱肋、横撑、吊索等设计均满足限界要求。

## 2 设计荷载选用

### 2.1 恒载

恒载与一般桥梁设计相同,主要有:

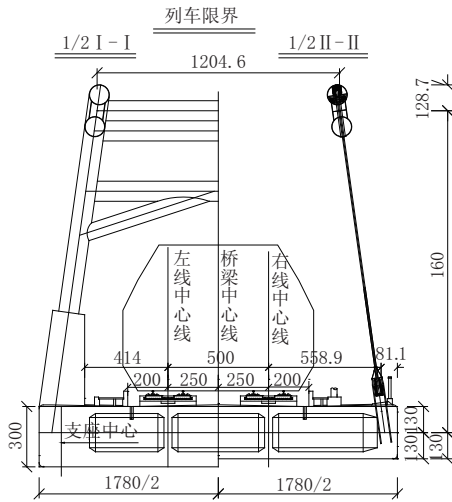


图7 简支拱行车工况限界检算图(单位:cm)

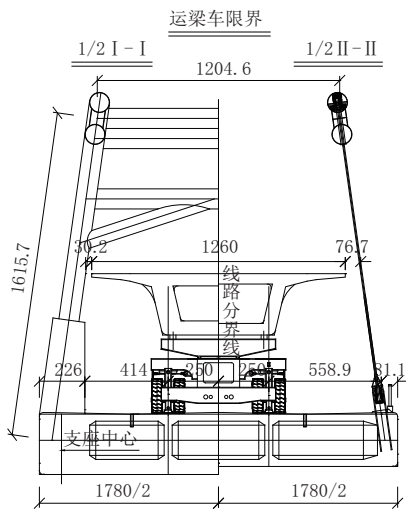


图8 简支拱运梁工况限界检算图(单位:cm)

(1)结构自重,包括钢筋混凝土、拱肋钢结构、分不同阶段施加的拱肋混凝土。

(2)二期恒载,包括轨道结构、防水层、栏杆、竖墙、防护墙、栏杆或者声屏障、接触网、人行道盖板、电缆等。

(3)混凝土收缩徐变,包括主梁混凝土和钢管内部混凝土。

## 2.2 活载

(1)纵向计算采用 ZK 标准活载设计,其图式见图 9。

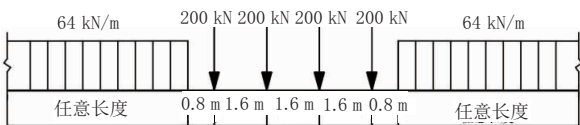


图9 ZK 活载标准荷载图式

(2)横向计算采用 ZK 特种活载设计,其图式见图 10。

(3)列车活载动力系数计算式为:

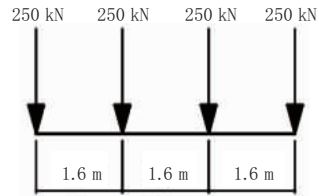


图10 ZK 活载特种荷载图式

$$1 + \mu = 1 + \left( \frac{1.44}{\sqrt{L_\phi}} - 0.18 \right) \quad (2)$$

式中: $L_\phi$ 为加载长度,m,当 $L_\phi < 3.61$  m时按3.61 m计,简支梁应取梁的计算跨度,横向计算时 $L_\phi$ 为横隔梁跨度(本例中为吊杆锚点间距)<sup>[3]</sup>。

(4)横向摇摆力:按照 100 kN 作用到钢轨顶面计算,只计列 1 条线路横向摇摆力。

(5)人行道荷载: $N=5$  kN/m<sup>2</sup>,设计主梁时不与列车荷载同时计算。

## 2.3 附加力

### 2.3.1 制动力或牵引力

制动力或牵引力一般按照列车竖向静活载的 10% 计算,与离心力或列车竖向动力作用同时计算时按静活载的 7% 计算。

### 2.3.2 风力

本桥迎风面积大,结构高度高,风荷载的计算不可缺少。风荷载强度  $W$  的计算主要根据地区基本风压  $W_0$  进行修正得到,修正系数包括:桥墩风载体型系数  $K_1$ 、风压高度变化系数  $K_2$ 、地形地理条件系数  $K_3$ 。

风荷载强度  $W$  按照《铁路桥涵设计规范》(TB 10002—2017)第 4.4.1 条计算:

$$W = K_1 K_2 K_3 W_0 \quad (3)$$

### 2.3.3 温度荷载

(1)计算构件本身的计算温度不同于外界气温,应按照《铁路桥涵设计规范》附录 D 确定。

(2)运营阶段温度荷载整体升降温:混凝土按照全年月平均气温计算;钢结构按照全年极端气温计算,考虑升温时,钢管(吊杆)比混凝土温度高 15 ℃,考虑降温时,钢管(吊杆)比混凝土温度低 20 ℃。

(3)日照温差:运营阶段主梁竖向非线性温度变化按升温 10 ℃ 考虑,并考虑 0.5 倍温度负效应;主梁横向非线性温度变化按升温 16 ℃ 考虑;左右拱肋之间(包含钢管及混凝土)温差为 5 ℃。

(4)运、架梁阶段,竖向非线性温度梯度按照 20 ℃ 升温考虑,不考虑降温。

(5)运营时环框计算时,日照温差按 +15 ℃ 考虑,

寒潮温差按  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  考虑<sup>[2-3]</sup>。

### 2.4 特殊荷载

(1)运梁车荷载:桥梁处于运梁通道上时需要检算运梁车荷载,见图 11。

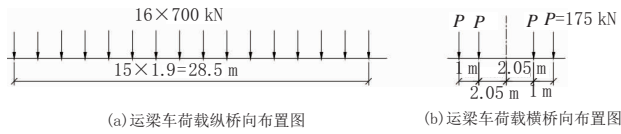


图 11 运梁车荷载图

(2)地震荷载:本桥地震荷载只用于计算地震防落梁装置。按照地震动峰值加速度与恒载转换为水平力来检算防落梁装置抗力。

## 3 主要计算结果

### 3.1 结构设计指标

结构形式和荷载基本确定之后即可采用 MIDAS Civil 或者其他有限元程序进行建模分析,各项计算结果应满足《高速铁路设计规范》(TB 10621—2014)和《铁路桥涵混凝土结构设计规范》(TB 10092—2017)。结构设计指标<sup>[2-3]</sup>及计算结果见表 1。表中: $f_{pk}$ 为预应力钢筋抗拉强度标准值; $f_c'$ 为预加应力时混凝土轴心抗压极限强度; $f_{ct}'$ 为预加应力时混凝土轴心抗拉极限强度; $f_c$ 为混凝土轴心抗压极限强度; $f_{ct}$ 为混凝土轴心抗拉极限强度。

### 3.2 结构强度

设计指标表中最主要的指标为结构强度和变形,本文介绍这 2 种主要指标的计算结果,其余指标均满足要求。

#### 3.2.1 主梁强度安全系数

主梁受到恒载活载弯矩作用和拱脚的拉力,属于偏心受拉构件。

(1)小偏心受拉。当计算轴向力  $N$  作用在钢筋  $A_p$  与  $A_s$  应力合力点和钢筋  $A_p'$  与  $A_s'$  应力合力点之间时:

$$K_N \leq \frac{f_p A_p (h_0 - \alpha_p) + f_s A_s (h_0 - \alpha_s)}{e} + \frac{f_s A_s' (h_0 - \alpha_s')}{e} \quad (4)$$

及

$$K_N \leq \frac{f_p A_p (h_0 - \alpha_p) + f_s A_s (h_0 - \alpha_s)}{e'} + \frac{f_s A_s' (h_0 - \alpha_s')}{e'} \quad (5)$$

(2)大偏心受拉。当计算轴向力  $N$  不作用在钢筋  $A_p$  与  $A_s$  应力合力点和钢筋  $A_p'$  与  $A_s'$  应力合力点之间时:

$$K_N \leq f_p A_p + f_s A_s - \sigma_{ps}' A_{ps}' - f_s' A_s' - f_c b x \quad (6)$$

此时,中性轴位置按下式确定:

表 1 结构设计指标及计算结果

序号	项目	检算条件	控制指标	计算结果
1	主梁设计安全系数	运营荷载下(主力)	$\geq 2.2$	3.6
		运营荷载下(主+附)	$\geq 1.98$	2.9
		安装荷载下	$\geq 1.8$	2.6
2	抗裂安全系数 $K_f$	运营荷载下	$\geq 1.2$	2.0
		安装荷载下	$\geq 1.1$	1.9
3	预加应力时的锚下钢绞线控制应力 $\sigma_{con}$		$\leq 0.75 f_{pk}$	1 302
4	预应力钢绞线应力 /MPa	传力锚固时钢绞线控制应力 $\sigma_p$	$\leq 0.65 f_{pk}$	1 115
5		运营荷载下钢绞线应力 $\sigma_p$	$\leq 0.60 f_{pk}$	1 046
6		疲劳荷载作用下钢绞线应力幅 $\Delta \sigma_p$	$\leq 140$	11.7
7	钢筋应力 /MPa	疲劳荷载作用下带肋钢筋应力幅 $\Delta \sigma_s$	$\leq 145$	11.6
8		主力组合 $\sigma_s$	$\leq 210$	普通钢筋构造配置不考虑承载
9		主力+附加力组合 $\sigma_s$	$\leq 270$	
10		传力锚固时混凝土压应力 $\sigma_p$	$\leq 0.75 f_c'$	14.9
11		传力锚固时混凝土拉应力 $\sigma_c$	$\leq 0.70 f_{ct}'$	0.02
12		运营荷载下混凝土压应力(主力) $\sigma_c$	$\leq 0.50 f_c$	7.35
13	梁部混凝土应力 /MPa	运营荷载下混凝土压应力(主+附) $\sigma_c$	$\sigma_c \leq 0.55 f_c$	16.2
14		运营荷载下混凝土拉应力	不出现拉应力	0
15		运营荷载下混凝土最大剪应力 $\tau_c$	$\leq 0.17 f_c$	7.71
16		抗裂荷载下混凝土主压应力 $\sigma_{cp}$	$\leq 0.6 f_c$	7.54
17		抗裂荷载下混凝土主拉应力 $\sigma_{tp}$	$\leq f_{ct}$	0.64
18	拱肋钢结构应力 /MPa	弯曲应力 $\sigma_w$	$\leq 210$	124
19		剪应力 $\tau$	$\leq 120$	65.7
20	吊杆	强度安全系数 $K_n$	$\geq 3.0$	3.2
21		疲劳荷载作用下应力幅 $\Delta \sigma_p$ /MPa	$\leq 200$	76
22	拱肋稳定性	稳定安全系数 $\lambda$	$> 5$	7.29
23		ZK+0.5 倍温度(0.63ZK+温度)/mm	1.4L/1 900	-15.8
24		ZK 静活载作用下,梁端桥台与桥梁之间竖向折角 /‰	1	0.46
25	变形	横向摇摆力、离心力、风力和温度作用下,梁体的水平挠度 /mm	1/4 000	0.29
26		梁缝两侧钢轨支承点间的横向相对位移 /mm	1	0.19
27		无砟轨道铺设后,竖向残余徐变变形 /mm	L/5 000 或 20	8.54

$$f_p A_p e_p + f_s A_s e_s - \sigma_{ps} e_p - f_s A_s e_s = f_c b x (e + h_0 - \frac{x}{2}) \quad (7)$$

按上式求得的混凝土受压区高度应符合下列条件:

$$x \leq 0.4h_0 \text{ 且 } x \geq 2\alpha' \quad (8)$$

上述式中:  $K_N$  为主梁强度安全系数;  $N$  为计算轴向力, MN;  $e$  为轴向力  $N$  至钢筋  $A_p$  与  $A_s$  应力合力点的距离, m;  $e_p$ 、 $e_s$  为轴向力  $N$  至受拉边预应力钢筋  $A_p$  及非预应力钢筋  $A_s$  中应力合力点的距离, m;  $e'_p$ 、 $e'_s$  为轴向力  $N$  至受压边预应力钢筋  $A'_p$  及非预应力钢筋  $A'_s$  中应力合力点的距离, m;  $A_p$ 、 $A_s$  为预应力钢筋和非预应力钢筋的截面面积,  $m^2$ ;  $f_p$ 、 $f_s$  为预应力钢筋及非预应力钢筋的抗拉计算强度, MPa;  $h_0$  为截面有效高度, m;  $f'_s$  为受压区非预应力钢筋的抗压计算强度, MPa;  $A'_s$  为受压区非预应力钢筋的截面面积,  $m^2$ ;  $b$  为矩形截面宽度, m;  $x$  为截面受压区高度, m;  $\alpha$ 、 $\alpha'$  为钢筋  $A_p$  和  $A_s$  中应力的合力点及钢筋  $A'_p$  和  $A'_s$  中应力的合力点至截面最近边缘的距离, m;  $\alpha'_p$ 、 $\alpha'_s$  为钢筋  $A'_p$  中应力的合力点及钢筋  $A'_s$  中应力的合力点至截面最近边缘的距离, m。

主要工况下主梁控制截面强度安全系数的检算结果见表 2。

表 2 主梁控制截面强度安全系数的检算结果

位置	主力(max)		主力(min)		主+附(max)		主+附(min)	
拱脚	5.5	7.9	6.5	5.2	4.9	11.7	8.6	4.7
L/8	5.5	8.1	6.3	5.0	4.8	13.1	8.5	4.5
L/4	5.7	8.4	5.9	4.8	4.7	19.7	9.2	4.1
3L/8	5.8	7.2	5.7	5.0	4.8	17.0	9.8	4.2
L/2	6.0	6.5	5.7	5.6	4.8	14.4	10.1	4.5

由表 2 可见,在主力组合作用下,最小强度安全系数为 4.8;主+附荷载组合作用下,最小强度安全系数为 4.1,满足规范要求。

### 3.2.2 吊杆拉力

吊杆的内力计算考虑了吊杆力的调整过程,吊杆力由初张力、恒载及运营阶段荷载引起的吊杆内力进行组合,保证吊杆的强度安全系数  $K_n \geq 3.0$ 。吊杆计算结果见表 3。

由表 3 可知,吊杆最小强度安全系数为  $3.2 \geq 3.0$ ,满足要求。

本桥吊杆疲劳应力幅允许值按 200 MPa 考虑,各吊杆应力幅见表 4。

由表 4 可知,吊杆最大应力幅为 76 MPa,满足《铁路桥涵设计规范》(TB 10002—2017)要求。

表 3 吊杆计算结果

项目	模型内力(主力)			模型内力(主+附)		
	$N_{max}$ /MPa	$N_{min}$ /MPa	$K_n$	$N_{max}$ /MPa	$N_{min}$ /MPa	$K_n$
D1	1 836	1 529	4.2	1 890	1 478	4.1
D2	2 148	1 813	3.6	2 202	1 747	3.5
D3	1 965	1 600	4.0	2 019	1 526	3.9
D4	2 287	1 916	3.4	2 339	1 839	3.3
D5	1 953	1 586	4.0	2 007	1 505	3.9
D6	2 333	1 975	3.3	2 392	1 889	3.3
D7	1 957	1 595	4.0	2 017	1 507	3.9
D6'	2 340	1 968	3.3	2 399	1 881	3.2
D5'	1 960	1 579	4.0	2 015	1 497	3.9
D4'	2 293	1 910	3.4	2 346	1 831	3.3
D3'	1 970	1 595	3.9	2 025	1 520	3.8
D2'	2 151	1 810	3.6	2 205	1 745	3.5
D1'	1 837	1 531	4.2	1 887	1 483	4.1

表 4 各吊杆应力幅表

单位:MPa

吊杆编号	ZK 静活载		应力幅 $\Delta\sigma$
	$\sigma_{min}$	$\sigma_{max}$	
D1	37.1	-0.1	37
D2	53.4	-0.1	54
D3	63.7	-0.2	64
D4	69.8	-0.2	70
D5	73.2	-0.2	73
D6	74.9	-0.2	75
D7	75.3	-0.2	76
D6'	74.9	-0.2	75
D5'	73.2	-0.2	73
D4'	69.8	-0.2	70
D3'	63.7	-0.2	64
D2'	53.4	-0.1	54
D1'	37.1	-0.1	37

### 3.3 结构变形

#### 3.3.1 系梁跨中挠度

系梁跨中挠度计算结果见表 5。

表 5 挠度计算结果

荷载工况	梁体竖向挠度 /mm	挠跨比
列车竖向静活载 + 0.5 倍温度作用	-12.4	1/6 436[1.4L/1 900]
0.63 倍列车竖向静活载作用 + 全部温度	-15.8	1/5 063[1.4L/1 900]

由表 5 可见,梁部最大竖向挠度为 15.8 mm < 1.4L/1 900=58.9 mm。

### 3.3.2 梁端竖向折角

在 ZK 活载静力作用下,最大梁端竖向折角见表 6。

表 6 活载静力作用下最大梁端竖向折角 单位:‰

位置	max	min
左侧墩	0.46	0.08
右侧墩	0.46	0.08

由表 6 可见,梁端竖向折角不大于 1‰,满足《铁路桥涵设计规范》(TB 10002—2017)要求。

### 3.3.3 主梁横向位移

运营阶段在列车摇摆力、风力及温度作用下,主梁结构横向最大位移为  $0.29 \text{ mm} < L/4\ 000 = 20 \text{ mm}$ ,满足《铁路桥涵设计规范》(TB 10002—2017)要求。

### 3.3.4 梁部残余徐变变形

梁部残余徐变上拱值为 10 a 收缩徐变之后的挠

度值减去成桥阶段的挠度值,最大为  $8.54 \text{ mm} \leq 20 \text{ mm}$ ,满足《铁路桥涵设计规范》(TB 10002—2017)要求。

## 4 结 语

钢管混凝土简支拱桥造型美观,结构受力合理,轨面至梁底高度较小,在高铁建设中得到了广泛应用。80 m 简支拱桥结构尺寸拟定合理,主梁和拱肋强度及变形能够满足规范要求,在高速铁路建设中是值得采用的桥型。

#### 参考文献:

[1] 邵旭东,程翔云,李立峰.桥梁设计与计算[M].北京:人民交通出版社,2007.

[2] 铁道第三勘察设计院集团公司.高速铁路设计规范 [M].北京:中国铁道出版社,2014.

[3] TB 10002—2017,铁路桥涵设计规范[S].

# 《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴,为您提供平台,携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

投稿网站: <http://www.csdqyfh.com> 电话:021-55008850 联系邮箱: [cdq@smedi.com](mailto:cdq@smedi.com)