

DOI:10.16799/j.cnki.csdqyh.2023.04.020

山区高速铁路简支梁与长联连续梁适宜性研究

曹文¹,叶九发²

(1.中铁西南科学研究院有限公司,四川成都611731;2.中铁二院工程集团有限责任公司,四川成都610031)

摘要:经过多年的发展,通过自主研究、引进消化吸收再创新,我国高速铁路技术得到了快速的发展。根据2016年国务院审议通过的《中长期铁路网规划》,在我国中西部广大地区,将新建多条山区高速铁路。对于山区客运专线铁路,当线路跨越长段沟谷地段时,需采用多个高墩跨越沟谷,多跨简支桥或长联连续梁桥是可供选择的桥梁结构型式之一,需对这种地形条件下的桥梁结构适宜性进行研究。为确定经济合理的桥梁结构型式,通过对比分析长联连续梁与简支结构的受力特点,并结合贵广、成贵等高铁桥梁设计经验,提出了不同联长条件下的桥梁设计原则及解决措施,可为山区高速铁路桥梁设计建造提供参考。

关键词:山区高速铁路;客运专线;长联连续梁;简支结构;适宜性研究

中图分类号: U448.25;U445.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-7716(2023)04-0070-05

0 引言

桥梁结构以其刚度较大的特点,在我国高速客运专线铁路中得到了较多的使用,已建成高速客运专线铁路桥梁比例平均占线路长度的40%以上。对于山区客运专线铁路,当线路跨越长段沟谷地段时,主要采用多跨简支桥或长联连续梁桥结构型式。

我国客运专线铁路开工项目集中,建设周期相对较短,多采用标准化设计,常用32 m、40 m、48 m跨径简支梁,以采用整孔箱梁工厂化制梁、架桥机架设为主,局部地段采用现浇箱梁及组合箱梁方案。跨越较宽大河流时,采用长联连续梁的型式跨越通航河流,已建成客运专线铁路中,采用了多座长联连续梁桥。运营情况表明,其结构能满足客运列车高速平稳、安全运行的要求。

1 设计主要控制因素

简支梁桥需满足高速列车运行安全性、平稳性以及无缝线路纵向稳定性等要求。为此,桥梁结构应具有一定的竖向、纵向、横向刚度。

《高速铁路设计规范》(TB 10621—2014)(简称《规范》)以列车脱轨系数、轮重减载率、轮轨横向水平力为判定标准,规定了桥上列车的安全性控制标准;以车体竖向、横向振动加速度、旅客乘坐舒适度指标,制定了桥上列车运行舒适度要求;同时规定了

桥面板在列车运行下的竖向振动加速度限值^[1]。为此,需建立车辆-轨道-桥梁耦合动力分析模型,计算列车及桥梁在列车高速运行下的动力响应,以检查其动力性能能否满足要求。

对于跨径小于96 m的简支梁,《规范》规定了桥梁竖向自振频率限值要求,规定了常用跨度简支梁不需进行车-桥耦合动力分析的竖向自振频率限值。

在桥墩纵向刚度满足规范限值的情况下,考虑高墩的纵向刚度与否,对于计算梁体竖向刚度相差较小。

桥梁竖向刚度主要受梁体竖向刚度控制,因此《规范》以静活载下的梁体跨中挠跨比、梁端转角作为桥梁竖向刚度的主要控制内容。

高墩结构的横向刚度对桥上车体的脱轨系数、轮轨横向水平力以及横向振动加速度、旅客横向乘坐舒适度指标有影响;纵向刚度对桥上无缝线路的钢轨力有较大影响。为此《规范》以梁端横向转角控制桥梁下部结构的横向刚度,并提供了桥墩纵向线刚度限值。

2 简支梁结构及受力特点

已建成的高速客运专线铁路采用了较多的32 m常用跨径以及40 m、48 m大跨径简支梁桥。为满足列车运行安全性、平稳性要求,已建立针对时速250~350 km/h的客运专线桥梁设计标准体系,并按此标准,建成多条客运专线铁路。

2.1 梁体构造

以“时速250 km客专铁路有砟轨道后张法预应力混凝土简支箱梁设计图(L=32 m)通桥(2005)2221

收稿日期:2022-05-07

作者简介:曹文(1986—),男,硕士,高级工程师,从事桥梁设计及施工控制技术研究工作。

系列梁图”为基础,研究简支梁梁型对无砟轨道的适应条件及提高速度目标值下的梁体刚度条件。经计算,该梁体刚度也可满足时速 350 km 无砟轨道客运专线铁路要求。在贵广、成贵客运专线的设计中,已成功地使用了该型箱梁,其计算车速达 350 km/h。32 m 跨径简支梁桥梁体构造见图 1。

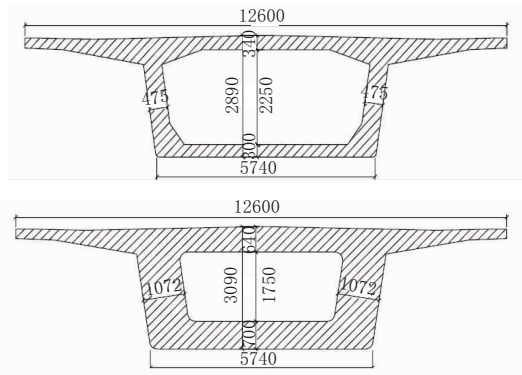


图 1 简支梁桥梁体跨中及支点截面(单位:mm)

时速 250 km 客专铁路有砟轨道后张预应力混凝土简支梁主要设计参数见表 1,表中括号内为规范限值。

表 1 简支梁主要设计参数

跨径 / m	跨中挠跨比	梁端转角 / rad	徐变上拱 / mm	竖向自振频率 / Hz
32	1/4 434(1/1 600)	0.72‰(1‰)	5.7(10)	4.36
40	1/4 431(1/1 600)	0.71‰(1‰)	7.9(10)	3.7
48	1/4 300(1/1 900)	0.72‰(1‰)	9.7(10)	2.94

由表 1 可知,梁体跨中挠跨比、梁端转角、徐变上拱均小于时速 350 km 客运专线铁路限值要求。

以 32m 跨径简支梁为例,梁体竖向自振频率为 4.36。《规范》规定,时速 350 km/h 铁路梁体竖向自振频率不低于 $150/L=4.69$ 时,无需进行车桥耦合动力分析;因此,对时速 350km/h 铁路的 32 m 跨径简支梁需进行车桥耦合动力分析。对于 40 m、48 m 跨径简支梁桥,《规范》没有规定无需进行车桥耦合动力分析的梁体竖向自振频率限值;因此,需进行车桥耦合动力分析。

经对 10×32 m、 10×40 m、 10×48 m 简支梁车-桥耦合动力分析,在考虑梁体混凝土残余徐变、温度力作用等效应,桥上列车运行的安全性、舒适性满足要求。

2.2 桥墩构造

高速客运专线铁路一般采用圆端形实体、空心墩,在桥墩较高时(墩高不小于 30 m)采用空心墩更经济合理。

桥墩纵向刚度主要受纵向线刚度控制,横向受

横向线刚度控制。桥墩采用钢筋混凝土圆端形空心墩,在顶部设置 300 cm,底部设置 250 cm 高的实体段。墩身外坡 40 : 1,墩空心内坡 60 : 1,空心顶部墩身壁厚均为 55 cm,根据所需纵横向刚度,相应增加墩顶纵横向尺寸。其中墩身与基础刚度分配为 7 : 3。

简支梁桥桥墩主要技术参数见表 2,表中所列刚度限值均按时速 350 km/h 确定,离心力所对应最小曲线半径为 5 500 m,纵向线刚度计算条件为双线。

表 2 简支梁桥桥墩主要技术参数

跨径 / m	墩高 / m	墩顶纵向位移 / 限值 / mm	墩顶横向位移 / 限值 / mm	纵向线刚度 / 限值 / ($\text{kN} \cdot \text{cm}^{-1}$)	横向线刚度 / 限值 / ($\text{kN} \cdot \text{cm}^{-1}$)
32	60	27.9/28.3	7.9/16	394/350	969/967
	80	27.9/28.3	11.6/16	412/350	686/573
40	60	20.9/31.6	8.1/20	552/550	1 066/1 023
	80	22/31.6	12.4/20	544/550	748/725
48	60	16.9/34.6	8.1/24	720/720	1 239/1 211
	80	17.4/34.6	11.7/24	743/720	943/855

2.3 刚度控制标准

为分析桥墩横向墩顶线刚度对车桥系统各横向响应的影响,调整地基刚度以改变墩顶横向线刚度,将不同刚度比的 32 m、40 m、48 m 三座简支梁计算模型分别在车辆行驶速度为 250、300、350 km/h 三种速度下进行车桥耦合计算^[2-3]。通过对比发现,桥梁的横向响应比较小,而车辆响应受墩顶线刚度的影响明显。故考虑将车辆横向加速度及横向舒适度指标作为桥墩墩顶线刚度的控制指标。32 m 简支梁在墩高 60 m 条件下,车辆横向振动加速度、横向舒适度指标受墩顶线刚度影响曲线见图 2。

由图 2 可知,对于 32 m 跨径简支梁,当墩高为 60 m、墩顶横向线刚度为 836 kN/cm 时,列车的横向振动加速度和横向舒适度指标均超过规定限值,考虑列车行车安全,墩顶线刚度推荐限值取 967 kN/cm。同理,当墩高为 80 m、100 m 时墩顶横向线刚度推荐限值为 573 kN/cm、407 kN/cm。

根据《规范》中对墩台横向水平线刚度的规定,在 ZK 活载、横向摇摆力、风力和温度的作用下,墩顶横向水平位移引起的桥面处梁端水平转角应不大于 1.0‰ 弧度。为验算三种墩高下 32 m 简支梁梁端水平转角,计算了行车速度(km/h)/曲线半径(m)为 350/7 000、300/5 000、250/3 200 三种情况下的离心力,并选取了最大离心力与风荷载、横向摇摆力以及温度作用荷载组合施加到有限元模型上。计算所得 32 m

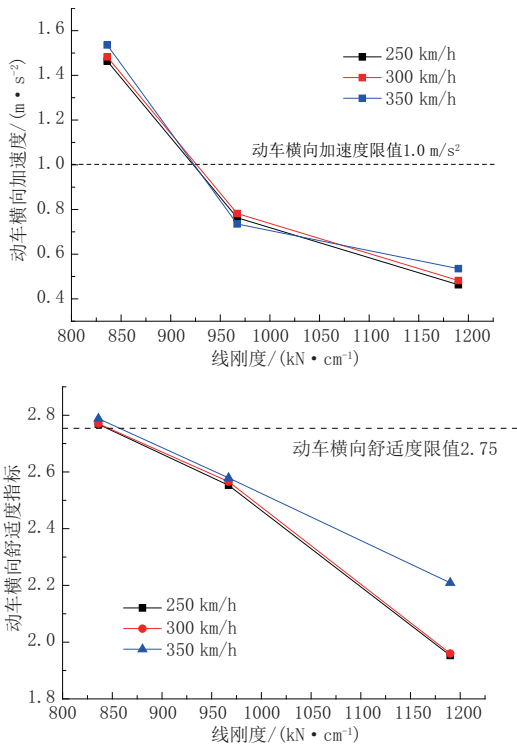


图2 车辆横向加速度和横向舒适度与墩顶线刚度关系曲线
简支梁墩高为60 m、墩顶横向线刚度为967 kN/cm时,梁端水平转角为0.409‰;墩高为80 m、墩顶横向线刚度为573 kN/cm时,梁端水平转角为0.689‰;墩高为100 m、墩顶横向线刚度为407 kN/cm时,梁端水平转角为0.971‰,均小于1.0‰弧度,满足规范要求。

根据《规范》所规定的连续刚构桥纵、横、竖向刚度控制标准,结合梁轨相互作用分析^[4-6]、横向刚度限值分析,提出了简支梁桥刚度控制标准,见表3。其中H为墩高,L为计算跨径。

表3 简支梁桥刚度控制标准

项目	限值(L=32 m)	限值(L=40 m)	限值(L=48 m)
梁端转角	有砟 2‰; 无砟 1‰;	有砟 2‰; 无砟 1‰;	有砟 2‰; 无砟 1‰;
梁体跨中挠跨比	L/1 600	L/1 600	L/1 600
徐变上拱	≤10 mm	≤10 mm	≤10 mm
墩顶纵向位移	$5\sqrt{L}$	$5\sqrt{L}$	$5\sqrt{L}$
墩顶横向位移	1‰H	1‰H	1‰H
主墩纵向线刚度/(kN·cm ⁻¹)	有砟 350; 无砟 350	有砟 550; 无砟 550	有砟 720; 无砟 720
主墩横向线刚度/(kN·cm ⁻¹)	H=60 m:967 H=80 m:573 H≥100 m:407	H=60 m:1 023 H=80 m:725 H≥100 m:513	H=60 m:1 211 H=80 m:855 H≥100 m:636

3 长联连续梁结构及受力特点

3.1 梁体构造

N × 32 m、N × 40 m、N × 48 m 连续梁桥梁体构

造与同孔跨的简支梁相同,即采用相同的梁高与顶、底、腹板尺寸,并在梁体中支点处设置横隔板。

3.2 桥墩构造

连续梁桥桥墩构造与简支梁桥相同,固定墩为圆端形空心墩,在顶部设置300 cm,底部设置250 cm高的实体段。墩身外坡40:1,墩空心内坡60:1,空心顶部墩身壁厚均为55 cm,根据所需纵横向刚度,相应增加墩顶纵横向尺寸。连续梁桥桥墩主要技术参数见表4,表中时速、离心力半径等计算条件与简支梁相同。

表4 连续梁桥桥墩构造技术参数

跨径组 合/m	道砟 型式	墩高/ m	墩顶纵向 位移/ 限值/ mm	墩顶横 向位移/ 限值/ mm	纵向线 刚度/ 限值/ (kN·cm ⁻¹)	横向线 刚度/ 限值/ (kN·cm ⁻¹)
10 × 32	有砟	60	28/28.3	9.7/16	974/660	1 287/967
		80	27.3/28.3	10/16	1 058/660	1 307/573
	无砟	60	25/28.3	9/16	1 107/1 080	1 446/967
		80	26.1/28.3	9.9/16	1 112/1 080	1 367/573
10 × 40	有砟	60	20.4/31.6	8/20	1 666/1 584	2 104/1 023
		80	22.1/31.6	8.9/20	1 585/1 584	1 911/725
	无砟	60	12.3/31.6	5.1/20	2 988/2 940	3 644/1 023
		80	13/31.6	5.6/20	2 980/2 940	3 490/725
8 × 48	有砟	60	12.1/34.6	5.6/24	2 988/1 584	3 644/1 211
		80	12.7/34.6	6/24	2 981/1 584	3 490/855
	无砟	60	10.6/34.6	4.9/24	2 988/2 940	3 644/1 211
		80	11.8/34.6	5.2/24	2 981/2 940	3 490/855

3.3 刚度控制标准

(1) 桥梁刚度控制标准

按照同样方法,分析不同跨径联长条件下的连续梁桥墩墩顶线刚度对车桥系统各横向响应的的影响。通过车辆横向振动加速度、横向舒适度指标受墩顶线刚度影响曲线,得出墩顶横向线刚度推荐限值。同时,根据《规范》中对墩台横向水平线刚度的规定,在ZK活载、横向摇摆力、风力和温度的作用下,经计算,墩顶横向水平位移引起的桥面处梁端水平转角均小于1.0‰弧度,满足规范要求。

根据《规范》所规定的连续刚构桥纵、横、竖向刚度控制标准,结合梁轨相互作用分析、横向刚度限值分析,以6跨连续梁为例提出了连续梁桥刚度控制标准,见表5。

(2) 固定墩纵向线刚度建议限值及处理措施

在连续梁温度跨度、联长一定的条件下,无论采用何种跨度组合,为满足桥上制动力下梁轨快速相对位移限值及钢轨强度的要求,连续梁固定墩的刚

表5 连续梁桥刚度控制标准

项目	限值(6×32 m)	限值(6×40 m)	限值(6×48 m)
梁端转角	有砟 2‰; 无砟 1‰	有砟 2‰; 无砟 1‰	有砟 2‰; 无砟 1‰
梁体跨中挠跨比	L/1 600	L/1 600	L/1 600
徐变上拱	≤10 mm	≤10 mm	≤10 mm
墩顶纵向位移	$5\sqrt{L}$	$5\sqrt{L}$	$5\sqrt{L}$
墩顶横向位移	1‰H	1‰H	1‰H
主墩纵向线刚度/(kN·cm ⁻¹)	有砟 480; 无砟 600	有砟 816; 无砟 600	有砟 1180; 无砟 600
主墩横向线刚度/(kN·cm ⁻¹)	H=60 m:967 H=80 m:573 H≥100 m:407	H=60 m:1 023 H=80 m:725 H≥100 m:513	H=60 m:1 211 H=80 m:855 H≥100 m:636

度限值应相同^[7-9]。不同温度跨度情况下,有砟轨道连续梁固定墩纵向线刚度建议限值及轨道处理措施见表6,表中所列均为单线所需线刚度,双线桥为表中所列值的2倍。同理可得无砟轨道情况。

表6 有砟轨道连续梁固定墩纵向线刚度建议限值

温度跨度/ 梁长/m	轨温变化 幅度/℃	最小线刚度/ (kN·cm ⁻¹ ·线 ⁻¹)	轨道扣件类型
80/112	30、40、50	130	常阻力扣件
96/136	30、40、50	240	常阻力扣件
128/168	30、40、50	408/140	常/小阻力扣件
160/220	30、40、50	590/330	常/小阻力扣件
208/288	30	830/300	常/小阻力扣件
	40	830/312	常/小阻力扣件
	50	1 238/792	常小阻力扣件
296/592	30	1 220/528	常/小阻力扣件
	40	1 655/1 016	常/小阻力扣件
	50	—	设置温度调节器
345/690	30	650	小阻力扣件
	40	1 300	小阻力扣件
	50	—	设置温度调节器

4 简支梁与长联连续梁的对比分析

4.1 梁体荷载效应对比

选用5×32 m、5×40 m以及5×48 m的简支梁和连续梁为研究对象,比较连续梁与简支梁在列车荷载作用下的变形及受力。建立空间模型对简支结构和连续结构的挠跨比、梁端转角、梁体内力等进行了比较,见表7。不同孔跨布置墩高均采用60 m。

由表7可知,采用同样梁体构造、下部构造的情况下,对于简支梁桥,设计列车活载产生的跨中挠度及梁端转角均大于对应的连续结构。其中,跨中挠度简支梁是同跨度连续梁的1.23倍;梁端转角简支梁是同跨度连续梁的1.18~1.22倍。因此,在同样结构构造

表7 简支梁与连续梁计算结果对比

参数名称	5×32 m 简支梁	5×32 m 连续梁	5×40 m 简支梁	5×40 m 连续梁	5×48 m 简支梁	5×48 m 连续梁
梁端 转角/‰	0.68	0.57	0.65	0.55	0.73	0.6
跨中弯矩/ (kN·m)	73 384	51 737	114 418	80 226	169 117	117 486
支点弯矩/ (kN·m)	0	59 553	0	94 905	0	141 631
跨中挠度 /mm	-8.3	-6.7	-9.78	-7.95	-12.67	-10.22
挠跨比	1/3 855	1/4 776	1/4 090	1/5 031	1/3 788	1/4 697

的情况下,连续梁比简支梁具有更好的竖向刚度。

而对于梁体内力来看,简支结构主要是跨中正弯矩,在设计列车活载作用下,简支梁跨中弯矩是同跨度连续梁的1.42~1.44倍。但由于连续结构由于支点处连续,存在负弯矩,因此简支结构与连续结构在梁体配筋方面存在较大差异。

4.2 施工方法对比

(1)简支梁桥

我国客运专线铁路常用32 m跨度简支梁为主,以采用整孔箱梁工厂化制梁、架桥机架设为主,局部地段采用现浇箱梁、以及组合箱梁的方案,并研制了配套的900 t箱梁制造、运输、架设备,在我国京津、武广、郑西、合宁等客运专线中得到了大量的使用。

在跨越河流等地形障碍时,为满足通航和行洪的要求,需采用更大跨度的桥梁结构时,已建客运专线铁路桥梁,采用了40 m、48 m、56 m、64 m跨度的简支梁,大跨度简支梁一般采用移动模架现浇或移动支架节段拼装的方法施工。

(2)连续梁桥

N×32 m、N×40 m、N×48 m连续梁可采用顶推施工,我国石太客运专线石嘴大桥采用的5×40 m连续梁就是采用顶推施工方法。

由于我国32 m简支梁已形成了成熟的运架技术,利用32 m简支梁的运架设备,采用先简支后连续的方法施工N×32 m连续梁也是可行的方案。

4.3 墩身构造对比

选用32 m、40 m、48 m跨径简支梁与连续梁为研究对象,对墩顶尺寸、墩低尺寸及混凝土方量进行比较,见表8。不同孔跨布置墩高均采用60 m,32 m、40 m、48 m孔跨的简支梁及32 m孔跨连续梁均采用常阻力扣件,40 m、48 m孔跨的连续梁采用小阻力扣件。

4.4 对比分析结果

多跨连续梁为满足桥上无缝线路轨道受力的要

表8 不同孔跨简支梁桥与连续梁墩身构造对比

桥梁结构	墩顶尺寸/m		墩底尺寸/m		混凝土/ m ³
	D1	B1	D2	B2	
32 m 简支梁	4.2	9.0	7.2	12.0	1 438
有砟 10 × 32 m 连续梁	7.4	9.4	10.4	12.4	1 784
无砟 10 × 32 m 连续梁	7.8	9.8	10.8	12.8	1 880
40 m 简支梁	5.2	9.1	8.2	12.1	1 552
有砟 10 × 40 m 连续梁	9.2	11.2	12.2	14.2	2 226
无砟 10 × 40 m 连续梁	11.2	13.2	14.2	16.2	2 963
48 m 简支梁	6.0	9.5	9.0	12.5	1 685
有砟 6 × 48 m 连续梁	7.8	9.8	10.8	12.8	1 880
无砟 8 × 48 m 连续梁	11.2	13.2	14.2	16.2	2 963

求,固定墩需具有较大的纵向刚度,其纵向刚度随着连续梁联长的增加而增加。在铺设常阻力扣件固定墩所需纵向刚度较大时,可采取铺设小阻力扣件的措施,以减小固定墩所需纵向刚度。在所需线刚度仍较大时,可采取在梁端设置轨道温度调节器的措施。

8 × 32 m、6 × 40 m 以下有砟轨道连续梁,采用小阻力扣件时,其固定墩所需纵向刚度为与 32 m 简支梁相当。N × 32 m、N × 40 m、N × 48 m 无砟轨道连续梁以及 8 × 32 m、6 × 40 m 以上的有砟轨道连续梁,固定墩所需纵向刚度均大于简支梁。

10 × 32 m 有砟轨道连续梁墩顶纵向尺寸是简支梁的 176.2%;墩高 60 m 时,混凝土数量是简支梁的 124.1%。10 × 32 m 无砟轨道连续梁墩顶纵向尺寸是简支梁的 185.7%;墩高 60 m 时,混凝土数量是简支梁的 130.1%。

10 × 40 m 有砟轨道连续梁墩顶纵向尺寸是简支梁的 176.9%;墩高 60 m 时,混凝土数量是简支梁的 143.4%。10 × 40 m 无砟轨道连续梁墩顶纵向尺寸是简支梁的 215.4%;墩高 60 m 时,混凝土数量是简支梁的 190.9%。

6 × 48 m、8 × 48 m 无砟轨道连续梁墩顶纵向尺寸是简支梁的 130%、186.7%;墩高 60 m 时,混凝土数量是简支梁的 111.6%、175.8%。

为使连续梁固定墩与活动墩构造差别不太大,对于联长大于 10 × 32 m、8 × 40 m、6 × 48 m 的连续梁,可采取在梁端设置轨道温度调节器的措施。

4.5 技术经济分析

根据上述分析可知,在受力及技术方面,同等荷载工况及跨径下,连续梁的跨中挠度、梁端转角均较简支梁明显减小;且连续梁可采用先简支后连续的方案,兼具工厂化预制的质量效率优势。因此连续梁比简支梁具有更好的受力及技术优势。

经济性方面,对于跨越河流、平坦沟谷的高速铁路高墩桥梁,由于下部结构造价在桥梁建设费用中的比重较大,在同等跨径组合下,采用连续梁的墩身造价比简支梁平均增加 45.98%,经济性不如简支梁;但随着跨径的增加,墩身数量总体减小,采用多跨连续梁较简支梁具有明显的经济优势。

综合技术经济分析,在 32 m 以下跨径宜采用多跨简支结构,40 m 及以上跨径宜采用多跨连续结构。

5 结论

综上所述,通过常用中小跨度简支梁与连续梁的对比分析,得到以下结论:

(1)适宜的地形条件下,中下跨度连续梁联长不太长时(温度跨度不大于 160 m),可采取多跨连续梁方案。

(2)对于有砟轨道联长不大于 8 × 32 m、6 × 40 m 的连续梁桥,其桥墩构造与同等跨度简支梁桥墩相当。

(3)有砟轨道联长大于 8 × 32 m、6 × 40 m 连续梁、无砟轨道 N × 32 m、N × 40 m、N × 48 m 连续梁,为满足桥上轨道力受力要求,固定墩均需要较大的纵向刚度,可采取铺设小阻力扣件的措施,减小固定墩纵向尺寸。但所需纵向刚度均大于同等跨度简支梁桥墩。

(4)联长大于 10 × 32 m、8 × 40 m、6 × 48 m 的连续梁,采取在梁端设置轨道温度调节器的措施,以减小固定墩纵向尺寸。

(5)对于跨越河流、平坦沟谷的高速铁路高墩桥梁,中上跨径(不小于 40 m)采用多跨连续结构具有明显的技术经济优势。

参考文献:

- [1] TB 10621—2014,高速铁路设计规范[S].
- [2] 西南交通大学桥梁结构振动与稳定研究室.石太客运专线工程车桥耦合动力仿真分析报告(初步设计阶段)[R].2004.
- [3] 西南交通大学桥梁结构振动与稳定研究室.石太客运专线工程车桥耦合动力仿真分析报告(工程可行性研究阶段)[R].2004.
- [4] 闫斌,戴公连,董林育.客运专线斜拉桥梁轨相互作用设计参数[J].交通运输工程学报.2012,12(1):31-37.
- [5] 赵洪波,周立群.简支梁桥上无缝线路梁轨相互作用分析[J].建筑科学,2010(26):13-18.
- [6] 张华平.高铁中小跨度连续梁桥梁轨相互作用研究[D].长沙:中南大学,2010.
- [7] 鄢勇.浅析日本铁路桥梁之刚度控制标准[J].高速铁路技术.2011,2(3):43-46.
- [8] 胡文军,李华云,肖海珠.基于考虑无缝线路轨道力的铁路下部结构刚度控制研究[J].高速铁路技术,2015,6(1):32-37.
- [9] 罗华朋,马旭峰,肖杰灵,等.桥墩温度荷载对高墩大跨桥上无缝线路的影响研究[J].铁道建筑.2015,55(6):127-131.