

中国高速铁路桥梁建设关键技术

郑 健

(中华人民共和国铁道部,北京 100844)

[摘要] 桥梁设计与建造是高速铁路建设的关键。在京津城际铁路桥梁、武汉天兴洲公铁两用长江大桥、南京大胜关长江大桥等建设实践中,广泛借鉴世界高速铁路桥梁的先进技术和成功建设经验,在建设理念、技术标准、设计特点、技术运用等方面,进行深入的研究和积极的探索,并得到了充分地运用,逐步形成了具有中国特色的高速铁路桥梁建设关键技术。

[关键词] 高速铁路;桥梁;关键技术

[中图分类号] U44 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742(2008)07-0018-10

在高速铁路建设中,桥梁设计与建造已成为关键技术之一。进入21世纪以来,随着中国高速铁路规模的迅速发展,通过广泛借鉴世界高速铁路桥梁先进技术和成功建设经验,在我国高速铁路桥梁建设实践过程中,逐步形成了具有中国特色的高速铁路桥梁建设关键技术。

1 高速铁路桥梁建设

1.1 世界高速铁路桥梁建设

桥梁作为轨道的下部结构,为确保高速运行条件下的安全性、平稳性和乘车舒适性要求,必须具有高平顺性、高稳定性和高可靠性等特点。目前世界上已建成高速铁路7 939 km,主要分布在日本、法国、德国、意大利、西班牙、比利时、英国、韩国、中国台湾等国家和地区。最高运营速度达320 km/h,各线桥梁比例从1.3%到74.5%不等。

各国根据其施工水平、施工周期、桥梁工点的地质地形等不同特点,在高速铁路桥梁建设上也表现出自己的一些特征。桥梁结构形式多样化,有预应力混凝土连续箱梁、简支箱梁、混凝土刚架、多片式T梁、上承式钢板连续结合梁、下承式钢桁梁、鱼腹式上承钢桁连续结合梁、大跨度系杆钢拱等多种结

构形式(见表1)。

表1 世界高速铁路桥梁常用跨度
Table 1 Common spans of high speed railway bridges in the world

	设计速度 $/(km \cdot h^{-1})$	跨度 $/m$	梁高 $/m$	高跨比	预加应力方式	截面形式	结构形式
法国	300	40	2.9	1/13.8	后张法	板梁结合梁	连续梁
		40	2.5	1/11.4		单箱单室	连续梁
德国	300	42	4.0	1/10.4	后张法	单箱单室	简支梁
		23	2.3	1/10.0			
意大利	300	23	2.5	1/9.2	先张法	单箱单室	简支梁
西班牙	330	24	2.3	1/10.4	后张法	5~9片式	简支梁
日本	270	8	1.3	1/6.0	—	板梁	连续
		10	1.4	1/7.0			刚构
韩国	300 (350)	25	2.4	1/10.0	先后混张	单箱单室	连续梁
		40	3.5	1/11.4	后张法	单箱单室	连续梁
中国 台湾	300 (350)	31.5	3.5	1/9.0	先张法	单箱单室	简支梁

法国高速铁路运营里程1 576 km,地中海线高速铁路最高行车速度为320 km/h,各线桥梁比例为1.3%~32.2%。在东南线和大西洋线上,桥梁常

[收稿日期] 2008-06-03

[作者简介] 郑健(1962-),男,广东潮州市人,铁道部副总工程师、客运专线副总设计师、工程设计鉴定中心主任,从事铁路工程技术设计咨询与审查

用跨度为 40 m,采用双线箱形等高预应力混凝土连续梁,梁体现场现浇,用顶推法施工。北方线由于桥梁需横跨高速公路和宽阔河流、施工期相对较短等因素,建造了跨度 50 m 左右的结合梁,以及一孔跨度 93.3 m 的下承式钢桁结合梁。据统计,北方线与巴黎地区联络线、东南延伸线的高架桥长约 12 km,钢混结合桥比例达到 50 %。

德国新建高速铁路总长 1 265 km,最高运行速度为 300 km/h,桥梁比例 2.7 % ~ 12.5 %,干线桥梁的标准跨度是 25 m,44 m 和 58 m。25 m 跨度主要用于高架桥,44 m 和 58 m 跨度则主要用于山谷桥。桥梁结构通常采用预应力混凝土筒支箱梁,一般采用就地灌注、移动支架施工或简支梁连续顶推等方法在现场制梁。

除筒支梁外,也常采用连续梁。大跨度桥梁除连续梁外,还采用 V 形刚构(135 m)和拱桥(162 m),钢桥则采用钢桁梁或钢箱梁混凝土桥面的结合梁。

德国科隆—莱茵/美因高速铁路,线路从北向南穿越 3 座中等大小的山脉,架设了 18 座大型谷架桥。其中最长的桥是哈勒巴赫塔耳谷架桥,长 992 m;最大跨度的桥是美因河桥,主跨为 130 m。

意大利高速铁路总长 533 km,按客货混运模式设计,目前高速列车运行速度 300 km/h,货车运行速度 160 km/h,桥梁比例 12.5 % ~ 19.5 %。罗马—佛罗伦萨线的高架梁结构基本上可分为 2 类:一类是工字梁由横梁联结,上面加盖板;另一类为箱形梁。罗马—那不勒斯、佛罗伦萨—米兰等高速铁路桥梁类型为预应力混凝土及钢混结合筒支梁,跨度一般为 55 m,43.2 m,33.6 m,24 m,一般由多个小箱梁组合而成,桥面总宽 13.6 m。

西班牙高速铁路总长 993 km,最高运行速度 300 km/h。以马德里—塞维利亚高速铁路为例,全线修建高架桥共 31 座,总长 15 km,桥梁比例 3.2 %。全线采用了两种类型高架桥,以钢筋混凝土预制筒支梁为主,部分为连续箱形梁高架桥。筒支梁梁形采用 T 形梁,一般由 5 根到 9 根筒支 T 形预应力梁组成,桥梁跨度采用 26.6 m 和 38 m,梁高分别为 2.05 m,2.1 m。

日本是世界上最早建设高速铁路也是高速线路最长的国家,运营里程达 2 049 km,线路最高运行速度为 300 km/h,桥梁比例相对较高,为 33.3 % ~ 61.5 %。东海道新干线除高架桥外,近 50 % 的桥

梁为钢桥和钢混结合梁桥,以后的几条新干线上钢桥的应用越来越少。出于养护维修方面的考虑,山阳新干线冈山以西开始大量采用板式整体无砟轨道,高架桥和混凝土桥的比例也越来越大,东北新干线混凝土桥占线路总长度的 70 %。新干线高架桥多采用钢筋混凝土刚架式高架桥和预应力混凝土箱形梁式高架桥。在地形平坦地段一般采用钢筋混凝土刚架式高架桥,地形起伏地段多采用预应力混凝土箱形梁式高架桥。

韩国首釜高速铁路总长 412 km,最高运行速度为 300 km/h,桥梁比例 27.1 %。绝大部分桥梁采用预应力混凝土连续双线单箱梁,标准跨度为 25 m 和 40 m 两种。主要结构形式为先简支后连续的预应力混凝土连续梁,预制梁均采用先张法预应力混凝土箱梁,3 m × 25 m 连续梁采用预制架设施工,2 m × 40 m 连续梁采用桥位现浇施工。

中国台湾南北高速铁路总长 345 km,最高运行速度为 300 km/h,桥梁总长 269 km,桥梁比例达 81.5%。主要以 30 m,35 m 跨度简支箱梁为主。其中,有 139 km 的桥梁选择了预制架设施工方法,占全部桥梁的 55.3%,曾经创下 22 个月架设 1 946 孔梁的成绩。

1.2 中国高速铁路规划

按照《综合交通网中长期发展规划》和《中长期铁路网规划调整方案》,规划新建客运专线 12 000 km,新建城际铁路 6 000 km。到 2020 年,形成以客运专线高速网为核心、快速线为基础、城际铁路为补充的快速客运网络,规划达到 50 000 km 以上。

1.2.1 客运专线网

“四纵”:北京—上海、北京—武汉—广州—深圳、北京—沈阳—哈尔滨(大连)、上海—杭州—宁波—福州—深圳。“四横”:徐州—郑州—西安—兰州、上海—杭州—长沙—昆明、青岛—石家庄—太原、上海—武汉—重庆—成都(沪汉蓉)。

1.2.2 城际铁路

在完善京津冀、长江三角洲、珠江三角洲城际铁路网的基础上,在辽中南城市群、山东半岛城市群、中原(郑州)城市群、关中(西安)城市群、江汉平原(武汉)城市群、湘东(长株潭)城市群、成渝城市群、海峡西岸城市群以及哈尔滨—齐齐哈尔、长春—吉林、南宁—柳州、九江—南昌、海南东部、昆明等经济发达和人口稠密地区规划发展城际铁路,覆盖区域

内主要城镇,以适应我国城市化进程进一步加快的需要。

其中:长三角以上海、南京、杭州为中心,形成连接沪宁杭周边重要城镇的城际客运网络。

珠三角以广深、广珠两条城际铁路为主轴,形成“A”字形线网,辐射广州、深圳、珠海等9个大中城市,构建包括港澳在内的城市1小时经济圈。

京津冀以北京、天津为中心,北京—天津为主轴进行建设,形成对外辐射通路。

1.3 中国高速铁路桥梁建设

截至2008年3月,京津、武广、郑西、石太、哈大、京沪等18条客运专线和城际铁路相继开工建设,并将从2008年起陆续投入运营,线路总长6761 km,桥梁总长3573 km,平均桥梁比重为52.8%(见表2)。

表2 中国在建高速铁路桥梁比重

Table 2 Ratio of high speed railway bridge in progress in China

项目名称	长度/km		座数/座	桥梁建设	
	建筑长度	运营长度		桥梁总长/km	桥梁比重/%
京津城际	116.57	120.00	20	101.00	86.64
武广客专	968.46	968.46	690	470.00	48.53
郑西客专	434.41	459.53	118	255.76	58.88
哈大客专	892.42	903.94	162	662.77	74.27
长吉城际	96.34	109.47	30	27.86	28.92
石太客专	189.93	189.93	94	39.61	20.86
胶济四线	263.43	362.30	120	49.77	18.89
合宁客专	131.28	134.50	33	24.21	18.44
合武客专	359.36	359.36	169	118.82	33.06
昌九城际	96.66	131.27	38	33.04	34.18
甬台温铁路	282.38	274.89	133	92.04	32.59
温福铁路	294.88	302.34	83	77.16	26.17
福厦铁路	263.63	272.79	154	80.65	30.59
厦深客专	501.23	514.79	142	187.59	37.43
广深港	102.45	104.40	49	56.80	55.44
广珠城际	141.03	142.23	57	132.56	93.99
海南东环	308.12	308.12	120	102.38	33.23
京沪高速	1 318.00	1 318.00	244	1 060.60	80.47
合计	6 761	6 976	2 456	3 573	52.84

2 中国高速铁路桥梁建设理念

2.1 保证高速条件下的安全与舒适

高速铁路桥梁与普通铁路桥梁的显著区别在于列车运行速度,确保设计速度目标值条件下的安全与舒适性,是高速铁路桥梁建设的关键之一,涉及动力响应、桥梁结构非弹性变形、稳定频率和路桥刚度过渡、大跨度桥梁低频振动、桥面构造以及高速铁路

线型要求等方面。

动力响应问题是高速铁路桥梁设计的关键。高速列车在桥梁上运行时,列车与桥梁之间的互动影响明显,在结构设计中除满足常规桥梁的静力强度、刚度要求外,对结构的动力特性必须高度重视。梁跨结构必须具有足够的刚度和自振频率,宜采用箱形梁等刚度大、动力性能好的结构形式。

控制桥梁结构非弹性变形对轨道持续稳定和平顺性的影响。高速铁路桥梁结构在与跨区间无缝轨道的相互作用以及在各种荷载工况下的变形,会直接导致桥上轨道结构的变形,影响高速列车运行的安全和乘坐的舒适。必须对梁轨作用的位移差值、桥墩台的水平刚度、基础的沉降变形、梁体挠度、梁端转角、预应力混凝土梁体的弹性变形及后期收缩徐变变形进行控制,使线路轨道平顺性保持在允许的范围内。

保持良好的线路动力性能。由于线路、水文、地质、立交等要求,高速铁路的长桥较多,有的长达数十千米,甚至上百千米,列车匀速行驶所引起的等跨简支长桥与列车达到某一稳定频率的问题需引起关注,并应避免对列车走行造成不利影响。路基填土相对于桥梁结构具有可压缩性,提供的竖向刚度也比桥梁弱。为了保证高速行车的安全和舒适,必须重视路桥刚度过渡问题,做好刚度过渡措施,减少路基、桥梁交变地段竖向刚度突变对高速行车的影响。

研究大跨度桥梁低频振动影响。在大跨度桥梁设计中,除常规动力学问题外,还需对高速行车条件下的低频振动问题进行专题研究与分析,把握其对行车以及对结构自身的影响。

合理设计桥面构造系统。高速铁路桥梁的桥面除布置轨道系统外,还设置电力、电气化、通信、信号、声屏障等相关设施。桥面在施工期间有施工运载机具通过,在运营阶段不仅走行高速列车,还有机械化养护维修设施通过。列车在高速行车时产生的风吸附作用,也将对桥面设施产生影响,进而影响高速行车安全。要重视桥面构造系统研究,综合考虑各种因素,合理布置桥面形式。

优化高速列车的运行条件。高速铁路的平面曲线半径大,不能按照传统桥渡的概念控制线路走向,除个别特大桥外,大多数桥梁的桥位受线形控制,需采用技术措施,以实现高速运行为前提。对于技术复杂、具有控制性要求的个别特大桥的桥渡设计,要在充分研究水文、地质、河道、航道及道路设施的通

行条件等因素的基础上进行综合比选,采用有利于缩短行车时分、技术经济条件好的方案,并结合施工条件,选择合理的桥式结构、桥跨布置、墩台基础形式。

2.2 注重环境与景观的适应

高速铁路桥梁建设,必须充分研究建设地区的环境因素,预判环境对桥梁的影响,解决不同自然环境条件下的基础设计、结构选型、环境相融性、构造措施等问题。

注重节约用地。建造高架桥梁与修建路基相比,能够少占良田,节约土地资源。中国高速铁路多位于东、中部地区,该地区人口稠密、道路纵横交错,采用高架桥能更好地适应城市的规划与发展,方便沿线两侧居民的出行。

减少噪声影响。列车高速运行,轮轨碰撞、列车受电弓与接触网摩擦、列车与空气摩擦、结构物自身振动都会产生很大噪声,需采取有效措施,重视减隔振设计,尽量减少噪声影响。目前桥梁支座普遍采用橡胶支座,轨道采用弹性橡胶垫,减振消振、减少噪声,减少对环境影响。穿越城镇或居民区的桥梁,在桥面外侧设置声屏障等措施。在建设运营各阶段,要严格控制对水体、土壤、大气的污染,减少对生态的破坏。

重视耐久性。优先采用预应力混凝土结构,根据我国高速铁路路网运输、维修天窗时间短的国情,按照环境类别或环境作用等级,进行桥梁的耐久性设计、施工,建造少维护易维修的耐久性工程。

塑造桥梁景观。高速铁路桥梁尤其是穿越优美自然景区、经过城市范围的桥梁,作为永久性工程和标志性建筑,必将融入所经地区人们的生活,给环境带来影响和变化。桥梁在发挥交通建筑主要功能的前提下,还要体现出与环境和谐统一的美学特性,形成与环境相协调的桥梁景观。在实用、安全、经济的原则下,更加突出美学要求,塑造出体现时代特征、新颖美观的桥梁建筑造型。

2.3 注重服务运输与综合效益

路网资源不足、运输能力短缺是制约中国铁路运输的主要问题,必须加快客运专线建设速度,尽早实现客货分线,大幅提升铁路运输能力。缩短高速铁路桥梁设计和施工周期是加快铁路建设的关键所在。

优化建设工期。为保证建设工期能够控制在较短的周期内,对于个别控制全线工期、技术复杂的特

大桥,如京沪高速铁路南京大胜关特大桥、武广客运专线天兴洲公铁两用斜拉桥等,采用单独立项、先期开工的方式解决工期问题,既保证了桥梁工程的合理周期,又加快了全线的建设速度。

工业化施工组织。高速铁路的桥梁比重很大,有的高达正线总长的80%以上,大多是标准跨度的简支梁长桥,数量巨大,有利于工厂化制梁,采用架桥机组织快速铺架,有利于加快桥梁建设速度。

集成专业技术。为满足少维护易维修的需求,优先采用耐久性预应力混凝土结构。要重视接口设计,协调桥梁与轨道、接触网、通信、信号、电力电缆线、综合接地等各专业之间的接口关系,综合考虑专业之间的系统集成技术,满足养护维修作业需要。

3 中国高速铁路桥梁技术标准

我国从20世纪90年代开始,开展高速铁路科研,组织编制高速铁路、客运专线的设计、施工规范和系列技术标准。迄今已初步形成时速200~250 km与300~350 km铁路客运专线勘察、设计、施工、验收等成套标准。其中,对高速铁路桥梁的设计标准也作出了规定。

3.1 设计活载标准

我国采用ZK设计活载(相当于0.8 UIC)作为高速铁路桥梁设计活载(见图1)。

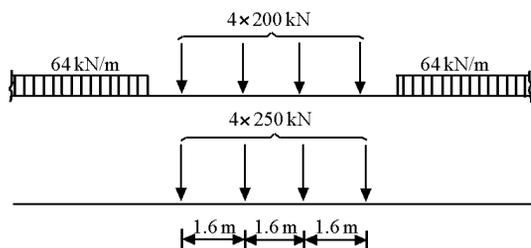


图1 我国客运专线采用的ZK活载图式

Fig.1 Demonstration of ZK Live load adopted by passenger-dedicated lines

如果直接把UIC活载作为客运专线铁路的设计活载,与运营活载的强度效应比余量太大,常用跨度的简支梁最少为50%左右,中等跨度的连续梁最少在40%左右,经济性差;采用0.7 UIC作为客运专线铁路桥梁设计活载,虽能包络各种运营列车活载效应,但余量较小;采用0.6 UIC作为客运专线铁路桥梁设计活载,虽能包络跨线、高速列车活载效应,但特殊情况下要求运营货物列车时,个别跨度经检算不能通过。

3.2 桥梁刚度的限值标准

3.2.1 挠跨比刚度限值

单跨桥梁挠跨比限值见表3。

表3 单跨桥梁

Table 3 Single span bridge

桥梁跨度/m	竖向挠跨比限值	横向挠跨比限值
$L \leq 24$	1/1 300 (ZK 活载)	1/4 000
$24 < L \leq 80$	1/1 000	1/4 000
$L > 80$	1/800	1/4 000

3.2.2 固有频率刚度限值

一般为避免车桥共振,梁的竖向自振频率取大于 $n_0 = 1.1V_{\max}/L$ 的计算值。考虑客运专线铁路车辆的动力作用较大,建议客运专线跨度 12~40 m 铁路简支梁的竖向自振频率限值采用 $n_0 = 1.2V_{\max}/L$, 按 350 km/h 的列车速度计算约为 $n_0 = 120/L$ (Hz) (L 以米计)。

3.3 桥梁变形的限值标准

3.3.1 梁端转角限值

在 ZK 活载静力作用下,有砟轨道桥梁梁端竖向转角 ($\theta_1 + \theta_2$) 不应大于 4 ‰。

无砟轨道桥梁梁端竖向转角 ($\theta_1 + \theta_2$) 不应大于 2 ‰ (见图 2)。

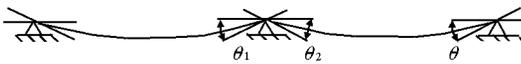


图2 梁端转角示意图

Fig. 2 Demonstration of beam end rotation

3.3.2 扭转变形限值

计算桥梁扭转时采用考虑动力系数的 ZK 荷载。

3 m 长度的最大扭曲变形不超过下列限值 (见图 3):

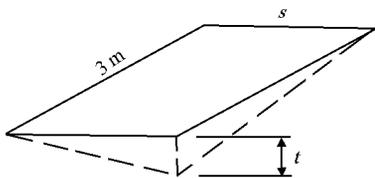


图3 容许的桥面扭转示意图

Fig. 3 Demonstration of allowable rotation of deck

$$V \leq 120 \text{ km/h}, \quad t \leq 4.5 \text{ mm/3 m};$$

$$120 \text{ km/h} < V \leq 200 \text{ km/h}, \quad t \leq 3.0 \text{ mm/3 m};$$

$$V > 200 \text{ km/h}, \quad t \leq 1.5 \text{ mm/3 m}。$$

3.3.3 预应力混凝土梁上拱控制值

徐变上拱限值为 10 mm, 当跨度大于 50 m 时, 限值为 $L/5 000$ 。无砟轨道的铺设应在梁体预应力张拉完成至少 60 天后进行。

3.3.4 桥涵基础工后沉降量限值

桥涵基础工后沉降量限值标准见表4。

表4 桥涵基础工后沉降量限值标准

Table 4 Standard critical settlement beyond construction of bridges and culverts

轨道结构	350 km/h		250 km/h	
	工后总沉降	相邻桥墩沉降量之差	工后总沉降	相邻桥墩沉降量之差
有砟轨道	30	15	50	20
无砟轨道	20	5	20	5

3.4 车桥动力响应指标

车桥动力响应指标分类见表5。

表5 车桥动力响应指标分类

Table 5 Category of dynamic response index of vehicle - bridge system

桥梁参数	车辆参数			
	运行安全性指标	限值	运行平稳性指标	限值
自振频率	脱轨系数 Q/P	≤ 0.8	车体竖向振动加速度 a_z	$\leq 0.13 \text{ g}$
横向振幅加速度	轮重减载率 $\Delta P/P$	≤ 0.6	车体横向振动加速度 a_y	$\leq 0.10 \text{ g}$
变位标准	轮对横向水平力 Q	$\leq 80 \text{ kN}$	平稳性指标 W	

斯佩林舒适度指标:

$$< 2.5 \quad \text{优};$$

$$2.5 \sim 2.75 \quad \text{良};$$

$$2.75 \sim 3.0 \quad \text{合格}。$$

桥面板在强振频率 20 Hz 及以下的竖向振动加速度:

$$\text{有砟桥面: } \leq 0.35 \text{ g};$$

$$\text{无砟桥面: } \leq 0.5 \text{ g}。$$

3.5 纵向力传递模式和桥墩台纵向刚度限值

桥上无缝线路钢轨附加压应力不大于 61 MPa; 桥上无缝线路钢轨附加拉应力不大于 81 MPa; 制动时, 梁轨相对快速位移不大于 4 mm。

注: 当混凝土简支梁下部结构最小纵向刚度满足表6时, 可不设钢轨伸缩调节器。

表 6 桥梁墩台最小刚度限值

Table 6 Minimum rigidity of pier and abutment

下部结构	跨度/m	双线桥下部结构最小纵向刚度/(kN·cm ⁻¹)
桥墩	20	240
	24	300
	32	400
	40	700
桥台		3 000

混凝土梁当温度跨大于 120 m 时,由于伸缩力过大,应设置钢轨伸缩调节器,释放钢轨附加应力。对于满足桥墩纵向最小刚度有困难的高墩谷架桥,

应采用结构措施,限制钢轨附加力。

3.6 桥面布置

现行规范桥面宽度规定见表 7。

表 7 现行规范桥面宽度规定

Table 7 Specification of deck width of current standard

客运专线类型	线间距/m	线路中心至栏杆内侧/m	桥面栏杆内侧净距/m	双线箱梁顶板宽/m
350 km/h	5.0	4.1	13.2	13.4
250 km/h	4.6	4.1	12.8	13.0

对于桥面宽度,需要做进一步优化(见表 8)。

表 8 《暂规》^[1-3] 规定的设计标准主要内容

Table 8 Main contents of design standard in temporary specifications^[1-3]

序号	项目内容	300 ~ 350 km/h	200 ~ 250 km/h	说明
1	设计使用寿命		100 年	指主要承重结构
2	设计活载图式		ZK(0.8 UIC)	
3	线间距	5 m	4.4 ~ 4.6 m	
4	线路中心至栏杆内侧		≥4.1 m	
5	线路中心至挡碴墙内侧		2.2 m	
6	轨下枕底道砟厚度		≥35 cm	
7	涵洞顶至轨底填土厚		≥1.5 m	
8	涵洞地基工后沉降	≤50 mm	≤100 mm	有砟轨道
9	墩台基础工后均匀沉降	≤30 mm (20 mm)	≤50 mm	有砟(无砟)
10	相邻墩台基础工后沉降差	≤15 mm (5 mm)	≤20 mm	有砟(无砟)
11	铺轨后梁跨徐变上拱		≤20 mm (10 mm)	有砟(无砟)
12	箱梁内最小净空高		1.6 m	
13	最外层普通钢筋保护层厚度		≥30 mm	
14	预应力管道保护层厚度		≥管道直径 ≥50 mm	结构顶面,侧面
15	桥面竖向加速度		≤0.35 g(0.5 g)	f≤20 Hz 有砟(无砟)
16	梁端竖向转角(两梁端之和)		≤4‰(≤2‰)	有砟(无砟)
17	梁端水平折角		≤1‰	
18	梁体水平挠跨比		≤L/4 000	
19	结构扭转变形		≤1.5 mm/3 m	
20	简支梁竖向自振频率	≥120/L (L≤40 m 时)	≥80/L (L≤20 m 时)	

4 中国高速铁路桥梁设计特点

桥梁是构建铁路本体的重要基本工程结构之一,也是铁路建设的关键技术。在高速运行的环境、技术要求以及我国特有的国情条件下,桥梁设计、建造和检测等许多方面具有与国外高速铁路以及我国

传统铁路不同的要求和特点。

4.1 地质条件复杂多样

我国幅员辽阔,东西南北地质地形条件差异很大。比如,东部沿海地带、大江大河两岸的冲洪积平原和海陆相沉积层以及内陆湿地主要以软土、松软土为主;中西部黄土高原、黄河流域冲积平原主要为

湿陷性黄土地区;一些线路还会遇到广泛分布的不良地质石灰岩岩溶地区等。极为复杂的地质条件为高速铁路桥梁的修建带来很多难题,应根据沿线地质特性确定合理的基础类型和桥梁结构。

4.2 高架桥多、桥梁比例大

在高速铁路建设中,综合考虑建筑物与地基变形、控制工后沉降、少占良田、环境保护以及维修保养等多种因素,通过桥梁与路基工程的技术经济比较,加大桥梁比例,修建高架桥(例如,在建的京津城际铁路桥梁累计长度占全线正线总长的比例为86.6%,京沪高速铁路为80.5%,广珠城际铁路为94.0%,武广客运专线为48.5%,哈大客运专线为74.3%)。

4.3 大量采用简支箱梁结构形式

根据我国高速铁路建设规模、工期要求和技术特点,通过深入的技术比较,确定以32 m简支箱梁作为标准跨度,整孔预制架设施工。预制结构分为有砟轨道整孔箱梁和无砟轨道整孔箱梁,预应力体系有先张法和后张法两种。时速350 km后张法32 m箱梁体积 329.7 m^3 ,重819 t。少部分采用12 m,16 m跨度的T形梁,预制吊装。

4.4 特殊结构桥多

为适应不同地区的自然环境差异,在客运专线建设中广泛采用特殊结构桥梁,数量之多在我国铁路建设史上前所未有,在世界其他国家高速铁路建设中也是少有的。特殊结构桥桥梁的一般形式主要有:拱桥、连续刚构、V形刚构、斜拉桥、组合结构桥(如连续梁与拱组合桥、斜拉刚构组合桥、连续钢桁梁柔性拱组合桥等)。

4.5 大跨度桥多

受国情路况的制约,我国客运专线中,跨度达100 m及以上的大跨度桥梁很多。据统计,在建与拟建客运专线中,100 m以上跨度的高速桥梁至少在200座以上。其中,预应力混凝土连续梁桥的最大跨度为128 m,预应力混凝土刚构桥的最大跨度为180 m,钢桥的最大跨度为504 m。

4.6 重视桥梁建筑美学

我国传统铁路桥梁建设多存在重功能、轻外观的现象,随着我国铁路建设水平的不断进步,铁路桥梁的美学效果已经成为当前高速铁路桥梁建设中重点考虑的因素之一。在桥梁设计构思时,除了考虑结构安全性与经济性之外,还同时从桥梁美学效果综合考虑桥梁形式美、功能美以及与合作的协调性,

从时代的需求出发,努力塑造新颖、美观的桥梁造型。

5 中国高速铁路桥梁关键技术

5.1 车桥线动力响应仿真技术

为保证列车高速、舒适、安全行驶,高速铁路桥梁必须具有足够大的刚度和良好的整体性,以防止桥梁出现较大挠度和振幅。我国从20世纪80年代初就开始进行车-线-桥动力相互作用理论和应用研究,建立和发展了多种分析模型,制定了相应的评定标准。在铁道部组织的桥梁动力性能综合试验中,试验车创造了300 km/h以上的速度纪录,验证了我国车-线-桥动力仿真分析方法的有效性和评定标准的可信性。通过多年科研攻关和工程实践,基本掌握了高速铁路车-线-桥动力响应作用机理。

5.2 无缝线路桥梁设计建造技术

桥上无缝线路钢轨受力与路基上钢轨受力不同,桥梁自身变形和位移将使桥上钢轨承受额外的附加应力。为了保证桥上行车安全,设计应考虑梁轨共同作用引起的钢轨附加力,并采取措施将其限制在安全范围内。钢轨附加应力包括制动力、伸缩力和挠曲力。经过多年的专题研究,目前我国系统建立了无缝线路梁-轨作用的力学模型,通过相应的模型试验和实桥测试验证了分析模型和理论的可靠性,制定了相应的技术控制指标。

5.3 无砟轨道桥梁设计建造技术

在无砟轨道桥梁设计中追求构造简洁、美观,力求标准化、便于施工架设和养护维修,确保其足够的耐久性和良好的动力性能,关键在于解决梁体的刚度和变形控制技术。通过对梁体的竖向挠度、水平挠度、扭转角、竖向自振频率等主要技术参数的研究,以及对预应力混凝土梁徐变上拱的控制研究,使桥梁结构能够满足无砟轨道铺设条件。目前我国已基本掌握了高速铁路无砟轨道桥梁的设计建造技术(见图4)。

5.4 大跨度桥梁设计建造技术

高速铁路桥梁通常宜采用小跨。但由于跨越大江、大河和深谷的需要,高速铁路大跨度桥梁的修建也不可避免,而我国高速铁路大跨度桥上速度目标值与其他路段保持一致,这也增加了大跨度桥梁的设计建造难度。主要设计建造技术包括:采用更高强度等级钢材、应用新型空间结构、研制大跨重载桥



图4 郑西客运专线无砟轨道实景图

Fig. 4 Ballast - less tracks on Zhengzhou - Xi'an passenger - dedicated line

梁专用装置、采用深水基础施工新工艺等(见图5、图6)。

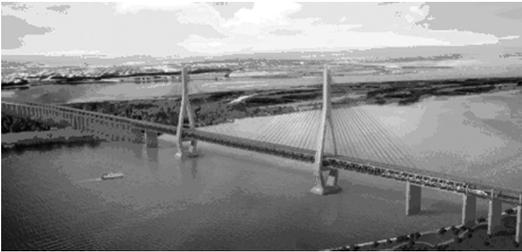


图5 京广客运专线武汉天兴洲长江大桥效果图, 主桥为(98+196+504+196+98)m, 设计行车速度为250 km/h

Fig. 5 Effect drawing of Wuhan Tianxingzhou bridge over Yangtze river on Beijing - Guangzhou passenger - dedicated line, main bridge is of (98 + 196 + 504 + 196 + 98) m, with a design speed of 250 km/h



图6 京沪高速铁路南京大胜关长江大桥效果图, 主桥为(109.5+192+336+336+192+109.5)m, 设计行车速度为300 km/h

Fig. 6 Effect drawing of Nanjing Dashengguan Bridge over Yangtze River on Beijing - Shanghai high speed railway, main bridge is of (109.5 + 192 + 336 + 336 + 192 + 109.5) m, with a design speed of 300 m/h

5.5 高架长桥快速施工技术

正在建设的高速铁路桥梁长度占线路长度的比例远远大于普通铁路,并出现了一些长度大于10

km、甚至达到上百千米的特长高架桥(见图7)。标准跨度简支梁一般采用在沿线现场预制梁厂集中预制,并以配套运架设备逐孔架设的施工方法,特殊跨度的连续梁采用原位浇筑的施工方法。通过工程实践,形成了一系列成熟的标准梁制、运、架工艺及相应装备,高质量、高速度地实现了特长桥梁的建造。



图7 京津城际铁路高架桥实景图

Fig. 7 Viaduct of Beijing - Tianjin intercity railway

5.6 车站桥梁设计建造技术

集铁路、地铁、地面交通为一体的大型综合交通客站从桥梁角度来说有两种类型,为房内设桥和桥上设房。北京南站、上海虹桥站采用房内设桥方式,要综合考虑各种因素,重点解决温度应力缝设置、结构综合受力分析以及合理控制工程量等问题;新武汉站(见图8)、新广州站采用桥上设房方式,桥梁承载了巨大的站房荷载,且多以集中荷载的方式作用于桥上,桥梁结构设计极其复杂,其关键是要上下结合巧妙布置,使站房的力尽快传于桥墩上,并合理控制桥梁桥墩变形对站房结构的影响。

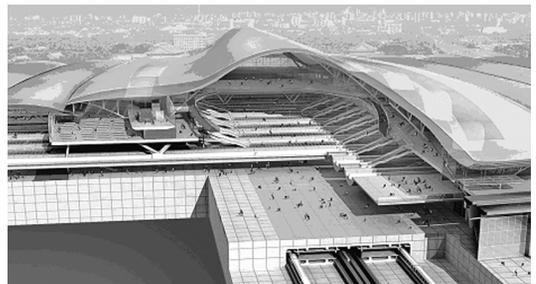


图8 新武汉客站站桥剖视图

Fig. 8 Profile of New Wuhan Railway Station Bridge

5.7 岔区桥梁结构设计建造技术

道岔构造复杂,其岔心结构是薄弱环节,岔前岔后温度力不均衡,对变形要求严格,跨区间无缝线路道岔更为复杂。在高架车站咽喉区,为确保道岔平面几何尺寸控制在允许的变形范围内,应将一副道

岔全部铺设于一联连续梁结构上,其岔尖、岔根距连续梁端缝均有一定的距离要求。

大型高架车站咽喉区道岔很多,有的多达数十副,难以将道岔群完全置于一个整体结构之上,需由若干不同类型的梁体结构共同支撑。在梁体接缝处将出现纵向、横向、竖向变位和水平面、竖立面转动变位。这些变位对钢轨和道岔的受力和行车安全性、舒适性都有影响,高速行车时,这个问题更为突出。因此,解决好道岔区桥梁三维变形控制难题,确保道岔和钢轨变形控制在允许的范围之内是道岔区桥梁设计的关键技术(见图9)。



图9 新广州站道岔区桥梁效果图

Fig. 9 Effect drawing of bridges in turnout area of New Guangzhou Station

5.8 900t 级整孔筒支梁制造运输架设技术

为解决 32 m 整孔预制箱梁的运架施工问题,国内自主研发了多种形式的 450 t 级提梁机、900 t 级架桥机、900 t 级运梁车、900 t 级移动模架造桥机等,从建场、制梁、移运、架设等方面摸索出整套制梁技术,目前已有 95 台套在各线投入使用,安全架梁近 3 万孔,具有较好的施工效率、安全性与可靠性,为今后客运专线建设积累了宝贵的经验(见图 10)。

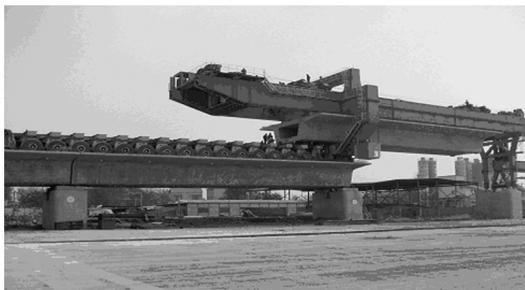


图 10 预制 32 m 混凝土筒支箱形梁架设实景图

Fig. 10 Erection site picture of pre-cast 32 m concrete simple-supported box girder

5.9 桥梁基础沉降控制技术

在地层为软土、松软土地段,沉降是桥梁基础设

计的主控因素,对工程投资影响巨大。通过对大量实测数据进行沉降曲线与沉降趋势的分析比较,提出桥梁群桩基础沉降计算采用“剪切变形传递法”及“分层总合法”;桥梁明挖基础及涵洞基底不处理基础沉降计算采用“规范法”(分层总和法);基底为换填或旋喷桩处理的涵洞基础沉降计算则采用“复合模量法”(EC 法)与“分层总和法”相结合的方法。目前,我国基本掌握了高速铁路桥梁基础沉降控制技术。

5.10 高速铁路桥梁支座应用技术

桥梁支座是连接桥梁上部结构和下部结构的重要组成部分。随着材料和加工技术的进步,目前我国桥梁支座已经形成了多种材料系列化定型产品,同时也形成了系列化设计、加工、安装、养护维修方面的技术规程。为满足高速铁路桥梁更高的刚度需求、适应某些区域沉降地区特点、预留建成后沉降的调整条件,我国已研发了满足调高需求的可调高盆式橡胶支座。

5.11 高性能混凝土材料应用技术

结合我国环境特点和材料、工艺、装备水平,高速铁路桥梁工程多采用高性能混凝土材质。高性能混凝土是选用优质原材料,掺加矿物细掺料和高效外加剂,采用现代技术制作的混凝土,具有低水胶比配制特点,能满足结构耐久性、体积稳定性等要求。目前我国已初步掌握高性能混凝土工作机理、材料控制标准、工艺等主要技术,系统制定了设计、施工、验收规范规程。

6 待深入研究问题

6.1 桥梁专业理论

结合高速铁路桥梁建设与运营实践,开展对梁轨作用及车-线-桥动力响应的实践监测、以及梁轨作用机理及车-线-桥动力响应研究,由深入往浅出方向发展。

6.2 桥梁建设规范体系

总结国内工程实践经验、综合科研成果,结合相关接口专业的发展完善,逐步整合高速铁路桥梁规范与接口专业规范的系统性和科学性,进一步提升我国高速铁路桥梁建设规范体系。

6.3 材料、工艺、装备技术

随着桥梁技术与材料技术的发展,进一步研究采用高性能混凝土、高强度钢材等优异材料;研究高性能混凝土的应用技术,减少预应力混凝土梁徐变

变形,提高混凝土结构耐久性;研究桥梁施工大型机具装备,研究顶推及转体施工工艺和施工装备,解决特殊地段桥梁施工问题。

6.4 接口设计

高速铁路技术是轨道、桥梁、路基、通信、信号、电力、牵引、供电、环保等专业技术高度集成的创新性工程体系。系统中各专业的技术创新,都将对桥梁技术的发展起到促进作用。在高速铁路的大系统中统筹考虑桥梁技术发展,综合考虑专业之间的接口以及设计、施工、运营、养护维修技术。

6.5 运营养护

随着高速铁路桥梁陆续建成,在提高建设质量的前提下,特别急需系统完善运营及养护维修技术,进而形成我国高速铁路桥梁运营养护维修的技术与

管理体系。

6.6 跨海桥梁

结合跨海桥梁的特殊建桥环境及通航要求,对跨海大桥深水基础设计与建造技术、波流力的问题,以及非通航孔桥梁的船撞力合理等级的确定、失控船舶撞击桥梁的预防、大型海上施工装备、耐久性问题,开展进一步的研究。

参考文献

- [1] 中华人民共和国铁道部. 新建时速 300 ~ 350 公里客运专线铁路设计暂行规定(上、下)[S]. 北京:中国铁道出版社,2007
- [2] 中华人民共和国铁道部. 新建时速 200 ~ 250 公里客运专线铁路设计暂行规定(上、下)[S]. 北京:中国铁道出版社,2005
- [3] 中华人民共和国铁道部. 新建时速 200 公里客货共线铁路设计暂行规定[S]. 北京:中国铁道出版社,2005

Key technologies for high speed railway bridge construction

Zheng Jian

(Ministry of Railways, PRC, Beijing 100844, China)

[Abstract] Bridge design and construction are key to high speed railway engineering. During the process of a series of bridge-building experiences such as Beijing-Tianjin intercity railway bridge, Wuhan Tianxingzhou bi-purposed bridge over Yangtze River and Nanjing Dashengguan bridge etc., we have borrowed sophisticated technologies and successful experiences from all around the world and carried out in-depth study and research on ideas and concepts, technical standard, design characteristics and applications of technologies, thus key technologies for high speed railway bridge with Chinese characteristics gradually took shape.

[Key words] high speed railway; bridge; key technologies