

京津城际铁路无砟轨道桥梁设计

孙树礼, 张文建, 王召祐, 苏伟, 吴彩兰, 卜庆颢

(铁道第三勘察设计院集团有限公司, 天津 300142)

[摘要] 京津城际铁路是我国第一条建成运营的时速 350 km 客运专线。设计中贯彻桥梁建设新理念, 确保高速条件下列车的安全性、舒适性和稳定性要求, 并遵循环境适应性、服务运输和综合效益的设计理念。全线采用长桥方案, 桥上采用最先进的无砟轨道技术, 桥梁占线路长度的 87.7%, 京津城际铁路桥梁设计、建造的成功, 为今后大规模高速铁路建设积累了宝贵的经验, 起到了示范性、标志性、样板性工程的作用。

[关键词] 京津城际铁路; 无砟轨道桥梁; 设计理念

[中图分类号] U442.5 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2009)01-0032-11

1 京津城际铁路概况

京津城际铁路是国家批复的《中长期铁路网规划》环渤海地区城际客运系统的重要组成部分, 线路起自北京南站, 沿京津高速公路第二通道至天津市域, 后沿京山铁路至天津站。线路全长 120 km, 设车站 5 座(北京南站、亦庄站、永乐站、武清站、天津站, 其中永乐站为预留车站)。本项目的建设, 大大缩短了京津时空距离, 有利于区域间资源共享和优势互补, 加速京津地区一体化进程, 推动天津滨海新区的开发开放, 促进环渤海地区经济又好又快发展, 并为北京奥运会成功举办提供了良好的运输服务。

1.1 建设经过

本工程由铁道部、天津市、北京市、中海油集团共同投资。2003 年开始研究; 2004 年 9 月国家发改委批复了项目建议书, 同年 12 月批复了可行性研究报告。2005 年 6 月完成站前施工图设计, 2005 年 7 月 4 日铁道部、北京市、天津市在京津交界召开了全线开工动员大会; 同年 12 月 18 日, 铁道部批准了全线开工报告, 全线开工建设; 2007 年 8 月底全线桥梁架设完成, 同年 12 月中旬完成全线无砟轨道施工; 2008 年 1 月完成 4 电集成工程; 2008 年 2 月开

始联调联试, 8 月 1 日正式开通运营。

1.2 建设目标要求

京津城际铁路是我国最早开工建设和最早建成的第一条 350 km/h 客运专线, 是客运专线建设的示范性、标志性、样板性工程, 更是京沪高速铁路建设的独立试验段工程。需满足“一流的工程质量、一流的装备水平、一流的运营管理”要求, 2008 年奥运会前开通运营, 建成后京津两地间实现 30 min 到达。

1.3 沿线自然特征

本线连接北京、天津两大直辖市, 沿线人口众多, 经济发达, 旅游资源丰富。跨越多条主要城市干道、高速公路、铁路等, 总计达 350 处之多。线路经过地区为冲洪积平原和冲积平原, 地形平坦开阔, 河渠纵横, 海拔高度由北京的 46 m 左右逐步下降至天津的 1 m 左右。

沿途经过河流属海河水系, 主要河流有凉水河、凤港减河、龙河、北京排污河、北运河、永定新河、新开河等。线路经过区属暖温带亚湿润气候区, 按对铁路工程影响的气候分区为温暖地区。土壤最大冻结深度北京地区为 0.8 m, 天津地区为 0.7 m。地震动峰值加速度值北京地区 0.2 g, 天津地区 0.15 g。沿线为软土、松软土地基, 主要为黏性土、粉土、砂类

[收稿日期] 2008-11-10; **[修回日期]** 2008-11-25

[作者简介] 孙树礼(1961-), 男, 河北定兴县人, 教授级高级工程师, 铁道第三勘察设计院集团公司总工程师, 长期从事高速铁路勘察设计综合技术研究; E-mail: sunshuli@tsdig.com

土及碎石类土,局部夹淤泥质黏土、淤泥质粉质黏土。软土主要分布于永乐至天津段,软土层厚一般在0.5~6 m。松软地基分布于DK25~天津之间,地表下1.5~18 m范围内,最深达23 m。部分地区由于连年大规模抽取第四系松散堆积层中的地下水,导致地层压密,引起大面积地面沉降,形成了多个沉降中心。北京亦庄、天津武清较为严重。

1.4 主要技术标准

全线采用Ⅱ型板式无砟轨道,一次铺设跨区间无缝线路。配备了运输生产、客运营销、经营管理3大系统。通信、信号、电力及牵引供电系统采用世界上先进的4电系统集成方式,实现了安全、高速、舒适、全天候运营,最小行车追踪间隔3 min。

主要技术标准为 a. 铁路等级:客运专线;b. 设计速度:350 km/h;c. 正线数目:双线;d. 限制坡度:一般12‰,困难20‰;e. 最小曲线半径:一般7 000 m,困难5 500 m,北京、天津市区按设计速度计算确定;f. 线间距:5 m,北京、天津市区按设计速度确定;g. 牵引种类:电力;h. 到发线有效长度:不小于650 m;i. 列车运行控制方式:自动控制;j. 行车指挥方式:调度集中。

2 桥梁设计方案选择

京津城际铁路是环渤海京津冀地区城际轨道交通网的重要组成部分,也是沟通北京、天津两大直辖市的便捷通道。桥上采用国际上最先进的无砟轨道技术,确保高速平稳舒适运行。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。在跨越河流、道路、铁路、管线及地面其它建筑物时,选择桥梁是必不可少的结构形式,有时甚至是唯一的。

2.1 贯彻桥梁建设新理念^[1]

高速铁路桥梁是构建高速铁路本体的重要工程结构,必须更新建设理念,坚持时代要求与国情条件相统一的原则。在多年来高速铁路试验研究的基础上,结合京津城际铁路特点,桥梁建设理念和技术路线主要体现在以下4个方面。

2.1.1 保证高速条件下安全性、舒适性和稳定性的理念

京津城际铁路是我国首条开通时速350 km的客运专线,如何保证桥梁达到与设计速度目标值相应的安全性、舒适性和稳定性,是桥梁建设者必须考虑的核心问题。在桥梁结构设计中必须重视由舒适

性要求控制的车桥动力特性问题、桥梁刚度和变形控制问题,在设计中必须研究解决标准跨度长桥、大跨度桥等不同桥梁所产生的特殊问题。在桥面设计中,必须考虑高速条件下的养护维修要求,重视站后系统工程接口的要求。

2.1.2 注重环境适应性的理念

中国高速铁路的建设和运用,必将与铁路经由地区的自然环境、经济环境、人文环境等紧密相关,受到各种环境因素的影响,同时,也对环境产生影响。因此,桥梁建设必须注重顺应环境,与各种环境因素构成和谐的共生关系。采用长桥方案,节约土地资源,方便沿线居民生产生活;重视减隔振设计,贯彻环保要求,在跨越铁路、公路等立交桥工程时,制定安全、合理的施工方案,采取合理防护,减少对既有设施的破坏和行车干扰;对既有路基等基础施工期开挖后要加强防护及监测,确保安全,施工后及时恢复;跨越河流时,桥墩设置尽量远离河堤,减少对既有河堤的开挖;在市区范围的桥梁,其外型、色彩尽量做到与周围的环境相协调;噪声敏感点附近的桥梁,桥上设置了声屏障;加强桥梁结构耐久性设计,保证结构的使用寿命;注重建筑美学,塑造与环境相协调的桥梁景观。

2.1.3 注重服务运输和综合效益的理念

从铁路建设和运用的全过程分析,在科学、合理的范围内加快建设速度,采用较短的建设周期,尽可能提前投产,虽然有可能增加部分初期投资,但有利于取得更好的综合效益。对于标准跨度长桥等量大面广的工程结构,宜组织工厂化生产、快速铺架的措施,加快建设速度。京津城际铁路由于桥梁比例大,施工周期短,质量要求高,梁型的选择必须考虑施工工期的要求。京津城际常用跨度桥梁一般为简支梁,有利于工厂化制梁,采用架桥机组织快速铺架,对保证全线工期有重要作用。在长大桥梁或桥梁集中地段按运梁半径不超过10 km设置一个制梁场,全线共设置梁场7个,单个梁场制梁数大部分在300孔左右,实现了工业化施工建造,以加快施工进度、保证施工质量。

根据中国高速铁路成网运输、维修天窗时间短的国情路况,铁路桥梁设计应满足少维修、易维护的需求,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,尽量减少交付运营后的维护难度和工作量,为运输管理创造更好的基础条件。

2.1.4 适应无砟轨道要求

由于全线采用Ⅱ型板式无砟轨道,对桥面的形状、精度都提出了很高的要求。为了适应无砟轨道,桥面采用了6面排水坡;为了保证轨道板底座与桥面之间相对滑动,采取后期打磨措施以保证梁面的平整度,并为此桥面采用了特殊的喷涂式防水层。在桥梁施工中预留轨道底座板与桥梁连接的剪力齿槽和剪力筋套筒,梁面预留侧向挡块连接钢筋。

2.2 采用长桥的设计原则

京津城际铁路两端线路在繁华市区通过,沿线的城市道路、高速公路以及既有铁路四能八达,自北向南与本线交叉有80余条等级公路、道路和铁路。全线跨越二级以上河道10条,地下管线不计其数。通过路桥综合经济技术比选,确定合理路桥分界高度为6.5 m。当路基填高较大时,采用桥梁不仅对沉降控制更为有利,而且经济性也好于路基。充分考虑本线位于两大直辖市之间,村庄密集人口众多、道路交通发达、地下管网纵横、土地资源珍贵、处于区域沉降地区等因素,大幅度提高了本工程的桥梁比例,确定京津城际铁路以桥梁为主,桥梁长度达到87.7%,表1为京津城际铁路桥梁分布情况。

表1 京津城际铁路桥梁分布

Table 1 Bridge distribution of Beijing-Tianjin inter-city railway

序号	中心公里标	桥梁名称	全长/m
1	DK11+646.88	北京环线	15 595.93
2	DK32+236.52	凉水河	21 563.10
3	DK63+660.97	杨村	35 812.18
4	DK94+770.44	永定新河	21 133.55
5	DK111+409.3	新开河	5 370.78

按上述原则,结合沿线具体情况,确定采用长桥方案,桥梁方案具有以下特点。

1) 穿越城市地段具有通透性,对跨越地下管线、道路的影响要优于路基。以桥代路有效地减少了铁路对沿线城市的切割,有利于与城市规划的结合,方便沿线人民的生产生活,并为未来发展预留了空间。

2) 区间设置桥梁在经济技术指标上优于路基,京津城际铁路沿线分布着大量的软土及松软土地基,尤其是对沉降的控制上桥梁有明显优势。

3) 以桥代路大量节省了铁路建设用地,贯彻建设节约型社会和走可持续发展道路的要求。建造高架桥梁能够少占良田,节约土地资源,解决路基对沿

线交通、生态的阻隔问题。与路基相比,采用桥梁每千米可节约土地 3 hm^2 ,可节约用地 300 hm^2 多。为节约用地,大部分地段选择高架桥取代路基的方案。

4) 桥梁的景观效果相对要好,采用桥梁具有通透性,桥梁结构本身以其流畅的形态、简约的造型,在保证功能性的同时,形成独特的桥梁景观。

5) 由于交通发达、地下管网、河流密集,采用长桥可减少路涵、路桥的频繁过渡,有利于提高旅客的舒适度。在铁路建设中,要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,采用桥梁比其它如路基等结构形式具有更大的优越性。由此可见,在京津城际铁路建设中,桥梁是极其重要的结构形式。

2.3 桥式方案选择结论

桥梁的作用是支承线路,城际铁路的平面曲线半径大,在充分研究水文、地质、河道及道路设施的通行条件等因素的基础上进行综合技术经济比选,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。

本线梁跨采用预应力混凝土结构,箱形截面以其整体性好、截面刚度大,外形美观、工程数量较小等优点,确定为本线桥梁截面的标准形式。

2.3.1 梁跨形式

在满足强度、刚度、舒适度基础上,依据技术经济、工期等综合比选确定梁跨形式。本线常用梁跨的桥梁孔跨布置一般以32 m简支梁为主,24 m, 20 m简支梁用于调跨;跨越主要道路一般采用大跨度连续梁,常用跨度有(32+48+32) m, (40+64+40) m, (48+80+48) m, (60+100+60) m, (47+70+70+45) m, (80+128+80) m。同时,根据工点的具体情况,本线桥梁采用了(80+128+80) m加劲拱连续梁、71.5 m简支钢管拱等特殊结构形式。

2.3.2 基础形式

桥梁基础是桥梁设计的重要部分之一,设计之前对基础选型进行了大量比较工作。由于全线桥梁采用无砟轨道,对基础的工后沉降有着更加严格的要求,无砟桥面桥梁墩台工后沉降不大于20 mm,相邻墩台沉降差不大于5 mm。

在满足沉降控制条件及桥梁纵横向刚度等各项技术参数的前提下,通过计算比较分析,确定合理的桩基布置形式及桩径。依据地质资料情况,确定全线桥梁设计均采用钻孔桩基础,一般采用 $\phi 1.0\text{ m}$

及 $\phi 1.25\text{ m}$ 的桩径,桩长控制在 50 m 左右,大跨桥梁采用 $\phi 1.5\text{ m}$ 桩径,桩长控制在 65 m 左右。

3 无砟轨道桥梁设计

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轨道平顺性、稳定性要求。在满足结构刚度、承载能力等前提下,还应重视以下问题。

3.1 桥梁刚度设计

由于列车高速运行,列车与桥梁之间的互动影响明显,因此,动力响应问题是高速铁路桥梁设计的关键所在。在结构设计中除应满足常规桥梁的静力强度、刚度要求外,还必须高度重视结构的动力特性。梁跨结构必须具有足够的刚度和自振频率,采用双线整孔箱梁结构形式具有足够的刚度和自振频率,桥梁墩台及基础整体具有足够的纵横向刚度,确保高速行车的安全性和旅客乘坐的舒适性要求。

开展桥墩刚度合理限值研究,在以往的常规铁路设计中,桥墩设计只考虑墩身强度、稳定性和墩顶位移,对墩台刚度没有明确要求,铁路铺设无缝线路提速后,既有铁路部分桥墩存在刚度不足现象。对于高速铁路,合理控制桥墩纵向水平线刚度是桥梁设计的关键。《300~350公里暂行规》对简支梁桥墩的纵向水平刚度提出了限值要求。对连续梁桥墩,尤其各种大跨度连续梁桥墩并没提出合理的刚度限值。京津城际桥梁比重大,对桥墩纵横向刚度或位移限值进行控制,从设计、施工、标准等角度考虑,参照国外高速铁路桥墩刚度的控制标准,根据我国铁路发展的实际情况,提出适宜大跨度连续梁桥墩的刚度或位移限值,一方面来指导设计工作,同时也为今后高速铁路的设计提供理论支持。

开展梁部变形及施工控制研究,全线采用无砟轨道,对梁部变形控制(收缩徐变)提出了更高的要求,对各种形式、不同跨度的简支梁、混凝土连续梁及系杆拱连续梁等的桥梁结构变形、施工监控开展研究,使设计理论计算结果在施工过程的监测中得到验证,为桥梁顺利建成提供技术保障,为桥上铺设无砟轨道板提供技术支撑。

开展桥梁动力仿真分析,对全线采用的不同跨

度简支梁跨、连续梁以及特殊桥梁结构,采用国际桥梁设计通用的检验方法,进行了车-线-桥耦合动力仿真分析,确保桥梁的各项技术指标均能满足时速 350 km 高速列车安全平稳运行和旅客乘坐舒适性的要求。

采用空间有限元方法建立全桥动力分析模型进行车桥耦合动力响应分析计算,计算中考虑桥墩与基础刚度的影响。对各种不同跨度的桥梁方案在国内外各类型动车组,速度等级为 $160\sim 420\text{ km/h}$ 作用下的车桥空间耦合振动进行了分析,主要结论如下:在所分析的列车类型与相应速度范围内,动力性能均满足规范指标要求;在分析的速度范围内,桥梁的动力响应随着速度的增长而增加,但均未出现明显的共振现象。动力分析表明,京津城际铁路采用的各种桥梁结构具有较好的动力刚度,可满足高速列车的行车要求。

3.2 桥梁非弹性变形控制

高速铁路桥梁结构在跨区间无缝轨道的相互作用下,以及在各种荷载工况下的变形,将直接导致桥上轨道结构的变形,从而影响高速列车运行的稳定性。因此,桥梁基础的沉降变形控制,均应以保证高速行车安全、舒适为目的,使轨道平顺性保持在允许的范围内。

开展桥梁基础沉降控制研究是设计的关键技术问题;吸收国内外桥梁沉降计算理论及沉降研究成果,结合沿线的实际情况,合理确定本线沉降控制标准是桥梁基础设计的关键所在。设计中采用合理的桩基布置形式、设计桩长,桩尖位于稳定土层,严格控制工后,沉降满足规范要求,并严格控制相邻墩台的不均匀沉降不超过 5 mm 的要求。对不良地质条件充分考虑,如软土及地震液化等地段基础设计可适当提高安全储备。进行桥梁不同施工阶段连续的沉降变形观测与评估,提出铺设无砟轨道的时机。

开展可调高支座研究。京津城际桥梁大部分位于软土及松软土地段,并且受区域地面沉降影响,桥梁基础产生不均匀沉降是难以避免的,为有效解决一旦发生的桥梁不均匀沉降问题,研究开发了适用于 350 km/h 客运专线可调高系列盆式橡胶支座。铁路桥梁上的可调高支座国内属首次采用,运营中一旦出现桥墩不均匀下沉,通过可调高支座可快速调整梁面高程,满足沉降地区各种桥梁结构的使用要求,为铁路安全运营提供了可靠保障。

开展桥梁结构耐久性设计,保证结构的使用寿

命。优先采用预应力混凝土结构,结合环境类别或环境作用等级,进行耐久性设计、施工,建造少维护、易维修的耐久性工程。

采用高性能混凝土可以提供结构的强度,延长使用寿命,便于施工;具有抗硫酸盐侵蚀的能力,桥梁主体工程上应用意义重大。结合工程特点,根据试验选定适合的高性能混凝土配比。

为了满足桥梁主体结构设计使用寿命 100 年,附属结构 30 年的使用要求,进行结构耐久性设计,统一考虑合理的结构布局和构造细节,预防结构的碱集料反应,控制徐变上拱限值、加强桥面防排水系统、结构有足够的混凝土保护层、易出现裂纹部位的钢筋加强,抗震构造的合理性。本线部分地段的地下水及地表水对混凝土具弱硫酸盐~强硫酸盐侵蚀,采取相应的防腐措施。对杂散电流采取接地处理,防止电流对钢筋的腐蚀。

3.3 精密测量网在桥梁工程中的应用

桥上采用 II 型板式无砟轨道,保证高速列车运营安全和舒适性的首要条件是轨道的高平顺性,它依赖于板式无砟轨道铺设和养护维修过程中的高质量,而获得高质量轨道几何线形的基础是精密的测量技术。结合 II 型板式无砟轨道技术特点,对桥梁施工精度提出了更高的标准。无砟轨道测量技术在国内首次采用,没有现成的规程规范可以参考,建立高等级测量控制网是非常必要的,主要体现在以下 5 个方面。

1) 建立高等级测量控制网,是客运专线桥梁施工的需要,也是今后线路养护维修工作的基础和保障。

2) 京津地区区域地面沉降因素的特征决定了本线建立一套稳固的、高精度的测量控制网至关重要。

3) 满足线下工程的施工精度以及后期的沉降观测、沉降评估工作要求。

4) 为满足无砟轨道铺设精度要求,必须建立高等级测量控制网,工程完工后,将作为运营期间工程监测控制网,控制线路的高平顺度,确保线路安全运营。

5) 满足区域性地面沉降相关问题对策研究,目前国内外没有区域性地面沉降区域修建高速无砟轨道铁路的实践经验。研究区域性地面沉降对修建无砟轨道的影响及应该采取的应对措施,是保证京津城际铁路顺利实施和安全运营的关键技术问题。

3.4 II 型板式无砟轨道桥梁设计

通过“引进、消化、吸收、再创新”,桥上采用国际上最先进的无砟轨道技术,其特点如下:

1) 预制轨道板和底座板为跨过梁缝的连续结构。

2) 底座板与梁面通过滑动层的设置保持滑动状态,在每孔桥梁的固定支座上方,通过在梁体预设锚固销(一般为两排 7 根 $\phi 28$ mm)和齿槽与梁体固结。

3) 通过梁缝处约 3.1 m 范围的梁面铺设 50 mm 厚硬泡沫塑料板,减小由梁端转角对无砟轨道结构的影响。

4) 底座板和轨道板沿线路横向采用侧向挡块固定,桥梁两端的台后路基上设置摩擦板和端刺。

上述结构特点决定了桥上连续板方案具有以下优点:轨道板采用工厂化生产,根据其轨道几何尺寸采用数控机床打磨,制造精度大幅提高;轨道板结构及外形尺寸不受桥跨、桥长的限制,与路基地段轨道板统一,轨道板本身的制造和安装铺设简便;纵向连续性好,大跨连续梁上可取消钢轨伸缩调节器,轨道养护维修相对减少,运行舒适度高;轨道施工进度较快,施工工艺简单,可以大幅度提高生产效率。直线地段桥上 II 型板式无砟轨道横断面及构造分别见图 1 和图 2,图 3 为台后摩擦板、端刺构造图,图 4 为施工中的桥上无砟轨道照片。

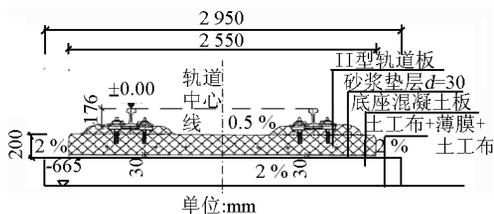


图 1 桥上 II 型板式轨道横断面

Fig. 1 Cross-section of type-II slab track on bridges

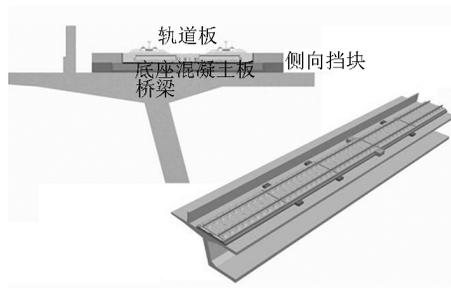


图 2 桥上 II 型板式轨道构造

Fig. 2 Construction drawing of type-II slab track on bridges

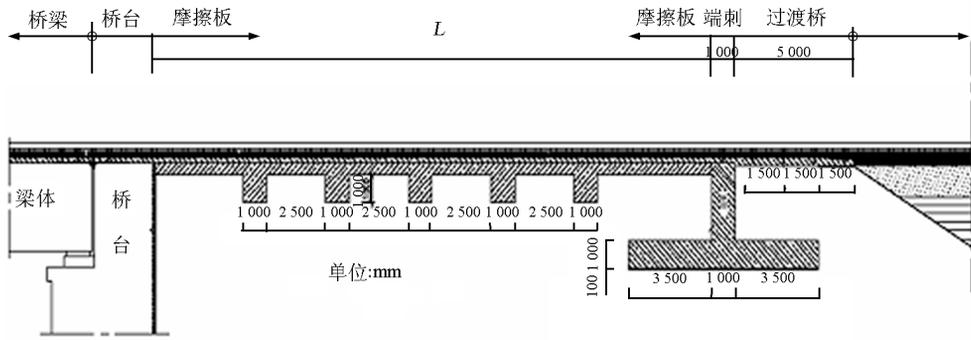


图3 台后摩擦板、端刺构造

Fig.3 Construction drawing of friction slab and end puncture of abutment - back



图4 施工中的桥上无砟轨道照片

Fig.4 Photo of non-ballast track under construction

施工的全桥指标相差不大,前者比后者高约2%。

表2 全桥指标

Table 2 Indexes of the whole bridge

跨度	预制架 架	移动模 架	满布支 架	军用梁 支架	先简后 连
32 m 简支梁	46 857	49 287	51 533	52 225	-
24 m 简支梁	47 914	49 740	52 583	53 122	-
2 m × 32 m	-	50 875	53 429	53 934	53 815
2 m × 40 m	-	50 907	52 830	53 579	-
3 m × 24 m	-	55 455	58 432	58 898	58 570

当采用同一种施工方法时,连续梁全桥指标由低到高依次是:2 m × 32 m, 2 m × 40 m, 3 m × 24 m (其中 2 m × 40 m 连续梁不采用先简支后连续施工)。对 2 m × 32 m, 3 m × 24 m 连续梁, 4 种施工方法指标由低到高依次是:移动模架、满布支架、先简支后连续、军便梁支架。对 2 m × 40 m 连续梁, 3 种施工方法指标由低到高依次是:移动模架、满布支架、军便梁支架。在同一条客运专线铁路建设中,简支或连续梁施工方法应分段集中采用。一般情况下,同一段落内主要采用的梁型和施工方法应该是单一的。

结合梁跨比较结果、运架设备及施工组织模式,确定常用梁跨以 32 m 简支梁为主, 24 m 简支梁为辅梁跨形式,采用集中预制、架桥机架设的施工方法,对于个别控制工点采用了移动模架造桥机和支架现浇施工方案。在实际工程中取得了较好的效果,也为其他客运专线梁跨选型提供了依据。

3.6 桥梁景观设计

注重建筑美学,塑造与环境相协调的桥梁景观。桥梁是交通系统的重要组成部分,经过城市范围的桥梁,作为永久性工程,建成后它将融入所经地区人

3.5 常用桥梁孔跨类型的比选

常用跨度梁跨、墩台采用时速 350 km 的客运专线标准。在基础选择时,对每种梁型的基础都进行了方案优化,包括桩径比选和严格的沉降控制计算。在满足桥梁下部结构强度、刚度、位移和沉降要求的前提下,力争使每种梁型的基础结构型式为最优,选择了标准跨度(24 m 和 32 m)的预应力混凝土简支箱梁、预应力混凝土连续箱梁(2 m × 32 m, 3 m × 24 m, 2 m × 40 m),结合工程地质、工期、施工方法等因素,进行综合技术经济比较。对于简支梁,当采用同一种施工方法时,32 m, 24 m 简支梁经济指标是接近的,随着施工方法的不同,32 m 梁较 24 m 梁全桥指标低 0.34% ~ 1.67%。各种施工方法下的简支梁、连续梁全桥指标见表 2。

对同一跨度简支梁, 4 种施工方法指标由低到高依次是:预制架设、移动模架、满布支架、军便梁支架。其中移动模架比预制架设高 5.2%, 满布支架比预制架设高 9.4%, 军便梁支架施工与满布支架

们的生活中,给城镇带来深刻的影响和变化。桥梁建设应遵循实用、安全、经济、美观的原则,注重工程要求与美学要求的结合,建造与自然环境、人文环境相协调的桥梁工程。

京津城际铁路桥梁设计中首次引入景观设计理念,开展了全线桥梁景观设计。在满足结构使用功能前提下,实现桥梁整体景观与周围环境的协调一致。以其靓丽的身姿出现在京津大地上,成为地标型建筑。主要体现在以下3个方面:

1)整体景观效果上,充分考虑桥梁整体景观效果,使之与周边环境相协调,突出体现时代风貌。主体结构尽量做到简洁、明快,没有冗余感;桥跨布置尽量采用等高度梁,保持桥梁线型协调,桥梁遮板采用流线型外观;梁部外轮廓采用斜腹板,转角处采用圆弧平缓过渡,使桥梁视觉流畅;为了桥梁线型均匀过渡,在以32 m简支梁为主的前提下,用于调跨的24 m简支梁与32 m简支梁等高。

墩台设计充分考虑景观与环境的协调。通过多种墩型景观效果比选,全线采用了圆端形桥墩、矩形桥墩两种常用跨度的墩形。矩形桥墩外观完全采用圆弧线过渡,重点突出墩形的曲线美,在市区范围内采用,墩形景观效果十分突出。

2)重点工点桥梁上,一般位于景观要求较高地段。大跨度桥梁由于体量大,设计中重点表现力学与美学相结合上,客运专线行车速度快,对桥梁结构的可靠性要求很高,综合考虑结构的安全性、经济性、施工性、美观性及前瞻性等因素,既不一味地强调力学,也不一味地追求新奇独特。

如跨北京四环主路采用的(60+128+60)m加劲拱连续梁结构,就是本线工点景观设计的典范,梁与拱有机结合,与周边建筑相呼应,体现出建筑协调之美,采用的结构形式有效降低了桥梁结构高度,保证了桥下净空,也使在四环主路上行驶车辆内的人没有压抑感。

对重点桥梁工点的墩形,针对不同工点、桥跨结构形式、周边环境进行了景观设计,如跨北京二环、三环、四环、五环分别采用了不同形式的墩形。

3)桥梁附属结构,包括桥梁排水系统、桥面系统、检查设备等,桥梁栏杆这种属于可触摸的桥梁附属构件,其造型将影响桥梁整体景观,结合桥梁所处自然环境,设计了不同材质、式样的桥梁栏杆。栏杆色彩选择是桥梁景观设计的重要环节,它对主体结构及附属结构的协调一致起着重要的作用。为了不

影响桥梁的整体效果,在城市范围取消了墩顶吊篮。桥墩上开槽,使沿墩的排水管设置在槽内。

4 桥梁工程实例

4.1 一般地段简支梁桥

以杨村特大桥为例说明一般地段常用跨度简支梁的布置形式。

杨村特大桥是本线最长的高架桥,中心里程为DK63+660.92,桥梁全长35.8 km。该桥地处软土及松软土地段,起于永乐站站外,先后跨越应半路、孔兴路、凤河、王河路、廊良路、规划京沪高速公路联络线、京津塘高速公路、碱东路、龙河、龙凤河故道、京福公路,于武清站前收桥。杨村特大桥桥跨布置见表3。

表3 杨村特大桥桥跨

Table 3 Superstructure of Yangcun super large bridge

桥梁名称	采用式样	孔数/个	跨度/m	全长/m
杨村	简支箱梁	7	20	3 5812.18
	简支箱梁	41	24	
	简支箱梁	1 023	23	
	连续箱梁	3	32+48+32	
	连续箱梁	1	40+64+40	
	连续箱梁	1	60+100+60	
	连续箱梁	2	45+70+70+45	

1)梁跨布置:本桥梁跨布置以32 m简支梁为主,24 m,20 m简支梁用于调跨。采用32 m简支梁是本线通过综合技术经济比选确定的梁跨形式,梁跨尽量统一,有利于预制架设,整体景观效果较好。跨越道路时根据桥跨布置采用了多种常用跨度连续梁,包括(32+48+32)m,(40+64+40)m,(60+100+60)m,(45+70+70+45)m。双线圆端形桥墩简支梁桥式效果图见图5,杨村特大桥双线圆端形简支梁照片见图6。



图5 双线圆端形桥墩简支梁桥式效果图

Fig. 5 Effect picture of simply-supported bridge with two-line rounded end piers

2)墩台基础:桥墩采用双线圆端形桥墩,桥台采用一字式桥台。墩台基础均采用钻孔灌注桩。施工中的圆端形桥墩照片见图7。

3)施工方案:简支梁采用梁场集中预制,架桥



图6 杨村特大桥双线圆端形筒支梁照片
Fig. 6 Two-line rounded end piers under construction



图7 施工中的双线圆端形桥墩
Fig. 7 Photo of simply-supported beam with two-line rounded end piers

48) m, (60 + 100 + 60) m, (45 + 70 + 70 + 45) m。图8为常用跨度(45 + 70 + 70 + 45) m连续梁照片。



图8 常用跨度(45 + 70 + 70 + 45) m连续梁照片
Fig. 8 Photo of the common continuous beam with span (45 + 70 + 70 + 45) m

2)墩台类型:连续梁桥主要采用两种墩形,双线圆端形桥墩及双线矩形桥墩。基础全部采用钻孔灌注桩,主墩基础桩径一般为1.5 m。

3)施工方案:本线连续梁结合场地以及工期要求可分别选择支架现浇、挂篮悬浇两种施工方案。

4.3 重点工点桥梁

4.3.1 跨北京五环(80 + 128 + 80) m连续梁

跨五环路主桥采用(80 + 128 + 80) m 预应力混凝土连续梁跨越,梁长290.9 m,是全线最大跨度的连续梁。桥墩采用矩形桥墩,全桥采用钻孔桩基础。图9为五环主桥桥型布置图,图10为五环主桥效果图,图11为成桥后的五环主桥照片。

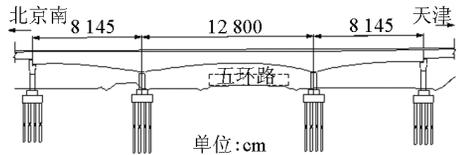


图9 五环主桥桥型布置图
Fig. 9 Layout plan of the main bridge over the 5th ring road



图10 五环主桥效果图
Fig. 10 Effect picture of the main bridge over the 5th ring road



图11 成桥后的五环主桥照片
Fig. 11 Photo of the built main bridge over the 5th ring road

机架设施工方案;常用跨度连续梁采用挂篮悬浇施工结合支架现浇施工方案。

4)桥面系:桥上采用板式无砟轨道,桥面采用6面排水坡,设置3相排水系统;桥面喷涂聚脲防水涂料;梁端采用高强度铝合金伸缩缝;桥梁栏杆采用直立柱、花瓶式隔柱钢筋混凝土栏杆。

杨村特大桥是典型的多孔等跨筒支长桥,以32 m筒支箱梁为主。通过该桥的建造实践,较好地检验了我国大吨位筒支箱梁的设计技术、预制工艺、运架设备、精测网技术的先进性、可靠性、稳定性。

桥位地处软土、松软土和黏性土地段,通过该桥的建造实践,成功攻克了高速铁路桥梁基础沉降控制问题,达到预期的控制标准。通过该桥大跨度预应力混凝土连续梁的施工实践,较好地解决了大跨度混凝土连续梁桥的变形控制难题。

4.2 常用跨度连续梁桥

1)孔跨布置:当跨越道路采用常用跨度筒支梁不能满足跨越要求时,采用多种常用跨度连续梁,包括(32 + 48 + 32) m, (40 + 64 + 40) m, (48 + 80 +

1) 主梁构造:主桥采用预应力混凝土连续箱梁结构,计算跨度为 $(80.6 + 128 + 80.6)$ m,桥面板宽13.4 m,桥梁宽度13.8 m。中支点梁高9.6 m,边支点及跨中梁高5.6 m。本梁采用三向预应力体系。

2) 施工方法:采用悬臂灌注结合支架现浇的施工方法。由于梁高较高,截面较大,混凝土体量大,本梁节段长采用2.5~3.5 m。在0~4号段悬臂施工完成后,施工方法调整为支架现浇方案。

通过该桥大跨度预应力混凝土连续梁的施工实践,较好地解决了大跨度混凝土连续梁桥的变形控制难题。

4.3.2 跨北京四环 $(60 + 128 + 60)$ m 加紧拱连续梁

跨越四环主桥采用 $(60 + 128 + 60)$ m 连续梁拱组合结构。主墩采用门型桥墩,边墩采用双线矩形桥墩,全桥采用钻孔桩基础。图12为四环主桥桥型布置图,图13为四环主桥效果图,图14为四环主桥实景照片。

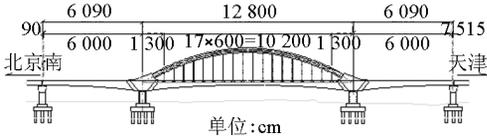


图12 四环主桥桥型布置图
Fig. 12 Layout of the main bridge over the 4th ring road

1) 主梁构造:主梁为预应力混凝土结构,采用单箱双室变高度箱形截面。跨中及边支点处梁高3.5 m,中支点处梁高7.0 m,梁高按二次抛物线变化,箱梁顶板宽18.0 m,通过边跨长9.75 m变宽段,渐变到梁端顶板宽13.4 m;底板宽12.2 m。



图13 四环主桥效果图
Fig. 13 Effect picture of the main bridge over the 4th ring road

2) 拱肋构造:拱肋采用钢管混凝土结构,计算跨度 $L = 128$ m,矢跨比1/6,拱轴线为二次抛物线。拱肋采用等高度哑铃形截面,截面高度3.0 m,拱肋钢管直径 $\phi 1.0$ m,内部填充C55无收缩混凝土。

3) 吊杆:共设18对吊杆,吊杆顺桥向间距6 m。



图14 四环主桥实景照片
Fig. 14 Photo of the main bridge over the 4th ring road

拱肋下缘设置钢锚箱,箱梁外侧翼缘板下设置梯形锚固块,用于吊杆锚固,吊杆在下端张拉。

4) 施工方法:采用“先梁后拱”的施工方法,利用挂篮悬臂浇筑主梁,主梁合龙体系转换完成后,桥面搭设临时支墩和支架,利用汽车吊拼装钢管拱肋。在支架上拼装调整线形后完成大段焊接及拱肋合龙。张拉主梁后期纵向钢索,泵送拱肋腹腔内混凝土,张拉吊杆,调整吊杆力,施工桥面系,完成全桥施工。

4.3.3 跨新开路1-72.5 m 简支钢管拱桥

新开路为天津市区内环线,道路总宽50 m,净高5.0 m。本桥与新开路斜交 14.6° ,经综合比选并结合景观要求确定采用1-72.5 m 钢管混凝土简支拱桥。图15为新开路主桥桥型布置图,图16为新开路主桥效果图,图17为施工中新开路主桥照片。

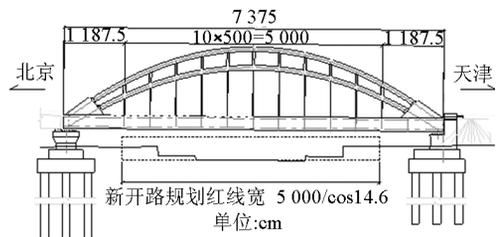


图15 新开路主桥桥型布置图
Fig. 15 Layout plan of main bridge over Xinkai road

1) 主桥结构:梁部采用双主纵梁的纵横梁体系,主纵梁梁高2.8 m,高跨比1/25.54。桥面板宽17.5 m,桥梁建筑总宽17.9 m。拱肋采用双层钢管混凝土叠拱,拱管直径1.0 m,上拱管矢高15 m,矢跨比1/4.767,下拱管矢高13 m,矢跨比1/5.5,上下拱管中心线拱脚处高度差2.0 m,拱顶高度差4.0 m。拱管内灌注C50补偿收缩混凝土。全桥共设11对吊杆。主梁全长73.75 m,共分5个梁段

(其中,两支点现浇段长 23.625 m,跨中现浇段长 23.5 m,跨中现浇段两侧各设 1.5 m 长的后浇合龙段),采用支架现浇施工。

2)下部结构:主墩采用分离式圆端型桥墩,墩身总高 4 m,墩身纵向 4.0 m,墩宽 6.0 m。桥台采用一字形桥台。桥墩、桥台均采用钻孔桩基础。

3)施工方法:本桥采用先梁后拱的施工方案,支架现浇梁部,梁部合龙后,桥面搭设支架拼装拱肋,安装吊杆。



图 16 新开路主桥效果图
Fig. 16 Effect picture of the main bridge over Xinkai road



图 17 施工中新开路主桥桥照片
Fig. 17 Photo of the main bridge over Xinkai road under construction

4.3.4 景泰路(12+17+12)m 型钢混凝土连续梁

景泰路中桥为改京沪铁路桥梁,既有京沪铁路采用结构形式为(8+16+8)m 框构中桥,改京沪铁路位于既有京沪铁路右侧 8.5 m,线路并行等高。施工图设计方案采用与既有京山铁路对应的(8+16+8)m 框构桥形式。在施工方案报批过程中,北京市要求不能采取临时封闭道路施工方案。为此结合工点具体情况,进行了多种桥式方案比选,最终确定采用(12+17+12)m 型钢混凝土连续梁方案,梁部施工方案采用顶推法,最大限度减少了对既有道路交通的干扰。

采用型钢连续梁主要特点是结构高度底,钢结构部分工厂化生产,现场施工速度快,即保证了桥下

净空要求,也满足施工期间不阻断交通的要求。

5 取得的主要成果及需要进一步研究的问题

5.1 取得的主要成果

在京津城际铁路建设中,针对工程特点,在桥梁工程领域重点提出并研究解决了常规桥梁式样、孔跨的选择,桥梁建筑景观设计,桥梁沉降控制技术与可调高支座研制,桥梁变形及控制技术,900 t 整孔箱梁设计、制造、运输、架设技术,简支箱梁移动模架和满堂支架设计建造技术,大跨度特殊桥梁设计建造技术,桥梁工程耐久性设计,车线桥耦合动力仿真分析等多项关键技术。

京津城际铁路桥梁工程设计建造技术,反映了我国铁路客运专线桥梁多年来的研究成果和发展方向。桥梁工程中多项关键技术问题的研究成果,解决了京津城际铁路建设中的众多实际问题,为以后类似建设项目提供了实践经验和技术积累。

5.2 需要进一步研究的问题

在大规模铁路建设的快速推进中,铁路桥梁建设水平得到整体提升和快速发展,形成了符合我国国情的高速铁路桥梁技术体系。今后,为了更好地适应铁路高速化发展要求,还要针对桥梁的建设、设计、施工,以及材料、装备等方面进行更进一步的研究和创新。

5.2.1 无砟轨道岔区桥梁结构研究

当高速铁路正线引出联络线以及高架车站咽喉区时,都需要采用大号码无砟轨道无缝道岔,且全部位于桥梁结构上。道岔区桥梁结构和大号码无砟轨道无缝道岔的相互适应性研究工作,目前国外尚未开展过相关研究,国内近年来刚刚起步,尚有许多问题亟待研究解决。如高速铁路无缝道岔对梁体各种变形、伸缩缝位置要求非常严格,为了维持桥上无缝道岔的高平顺性、高稳定性,确保高速铁路运营的安全、舒适,对桥梁刚度、梁端转角、伸缩缝位置的要求应该高于非道岔区,需要通过研究对这些值进行量化处理,为今后高速铁路和其它类似工程提供建设依据。

5.2.2 侧风影响下的车桥动力分析

目前,对于桥梁结构本身的抗风设计,规范给出了明确的规定,桥梁结构本身安全应有保证。但对于在风荷载作用下的桥上高速运行的列车来说,目前的做法是根据风速的大小来对列车进行限速,除此之外,没有别的更好的措施。

高速列车本身对结构的位移、刚度等限值要求很高。在风荷载下,如何保证列车高速安全、提出限速限行及其他措施,对保证安全至关重要。

对桥梁刚度特别是横向刚度目前尚无规定,目前的车桥耦合分析未考虑风荷载的影响。由于风速大小有着极大的不确定性、不可预见性和短时性,因此,对平稳性、安全性和舒适性要求非常高的高速运行的桥上旅客列车来说,仅仅依靠采取临时限速的措施是远远不够的。这一点,从我们日常生活中在风天驾驶机动车辆的情况就可以有所体会。因此,很有必要对风荷载作用下高速列车桥上运行安全对策进行研究。

5.2.3 完善运营养护维修技术

在一大批高速铁路桥梁陆续建成的形势下,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制。

5.2.4 创新桥梁材料、工艺、装备技术

要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 结语

京津城际铁路顺利建成通车,成为我国铁路建设史上一座新的里程碑。京津城际铁路桥梁设计成果充分反映了我国客运专线桥梁多年来的研究成果和发展方向。通过京津城际铁路无砟轨道桥梁工程设计中多项关键技术攻关及科研成果,解决了京津城际铁路桥梁建设中众多的工程实际问题。京津城际铁路桥梁的工程实践,为我国大规模建设高速客运专线铁路提供了技术支撑以及工程实践经验和技巧积累。

参考文献

- [1] 郑健. 中国高速铁路桥梁[M]. 北京: 高等教育出版社, 2008

Design of unballasted track bridges in Beijing-Tianjin inter-city railway

Sun Shuli, Zhang Wenjian, Wang Zhaohu, Su Wei, Wu Cailan, Bu Qinghao
(Third Railway Survey and Design Institute Group Co., Ltd, Tianjin 300142, China)

[Abstract] Beijing-Tianjin inter-city railway is the first built passenger dedicated line with the speed of 350 km/h in our country. During the design, new ideas of bridge construction were carried out in order to ensure the safety, amenity and stability requirements of the train under high-speed condition. At the same time, concepts of environmental adaptability, serving for transportation and comprehensive benefits were followed. In the whole line of the railway, long-bridge scheme was adopted, and the most advanced technology of unballasted track was utilized in bridges which account for 87.7% of the total line. The success of the design and construction of bridges in Beijing-Tianjin inter-city railway accumulated valuable experiences for large-scale construction of high-speed railway at the future. And roles of demonstration, landmark and prototype are played at the same time.

[Key words] Beijing-Tianjin inter-city railway; unballasted track bridge; design concept