

宽幅异形钢板组合梁的设计与研究

王 犇

(北京市市政工程设计研究总院有限公司, 北京市 100082)

摘 要:以丰台火车站东侧立交专用匝道宽幅异形钢板组合梁桥为研究对象,从结构优化和安全设计两方面对组合梁桥进行分析,以桥梁结构安全性与经济性为原则,提出最优设计方案。在有限元软件中,采取刚臂连接模拟剪力钉设置,结合混凝土桥面板和工字形钢主梁,建立全桥整体模型;通过调整中横梁设置个数、改变支座平面布置方式,优化桥梁结构设计;根据桥梁实际受力情况,分析桥梁结构在常态下钢主梁的刚度、承载能力、屈曲稳定和疲劳应力情况。结果表明:在满足结构使用安全的情况下,减少中横梁数量,会增加结构应力,降低稳定安全系数;宽幅异形钢板组合梁受混凝土收缩影响明显,外侧支座容易脱空,优化支座布置显得尤为重要;在正常使用状态下,钢板组合梁外侧主梁刚度较小,变形明显,应力较大,最早容易出现屈曲失稳,且受疲劳荷载影响较为敏感。

关键词:宽幅异形;钢板组合梁;优化设计

中图分类号: U448.21+6

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2023)08-0084-04

0 引 言

近些年来,随着我国钢铁产量的提高,施工技术的不断完善,钢结构桥梁建设已具备足够的物质基础和先进的技术条件。在当前钢结构快速发展的大背景下,应国务院、交通部、住建部等发布关于鼓励推广钢结构桥梁的意见要求的前提下,以钢结构为主的桥梁设计已经站在了桥梁建设发展的最高舞台。众所周知,随着桥梁跨径的增大,钢结构桥梁经济优势更加明显;而相对于中小跨径的混凝土结构桥梁,在建造成本上小跨径钢梁存在必然的劣势。钢板混凝土组合梁结构通过充分发挥钢材与混凝土两种材料的优点,在中小跨径桥梁领域,对推进桥梁建设经济化、工业化、标准化、智能化、快速化建设有着不可或缺的作用^[1]。

钢板混凝土组合梁由工字形钢主梁通过剪力键与上层混凝土桥面板连接,下缘工字形钢主梁抗拉;上缘混凝土桥面板抗压,同时混凝土桥面板作为改善钢结构抗疲劳与耐腐蚀问题的保障,整体结构受力明确,稳定性和耐久性能好。过去,钢板混凝土组合梁多应用于较为统一的标准断面结构化实施,在宽幅异形的桥梁体系中的应用缺乏一定经验。因此,笔者以丰台火车站周边市政配套工程为依据,对本工程中宽幅异形钢板组合梁的桥梁体系进行深入研究,

在满足合理化设计、快速化施工的前提下,本文将从桥梁构造设计、结构体系受力分析等多方面进行阐述与研究,为今后相似工程的桥梁建设提供一定的设计经验。

1 工程概况

丰台火车站位于丰台区,地处北京市中心城西南部,西南三环与西南四环之间,与天安门直线距离约10 km。丰台火车站周边市政配套工程包括城市主干路2条(丰草河北路、四合庄西路)、城市次干路2条(东货场路、丰台东路)、站房东侧立交专用匝道和西侧专用匝道工程。DN匝道桥为站房东平台南侧进站匝道,设计起点始于丰台东路北侧,沿四合庄西路向北抬升接入站房东侧平台南侧,设计终点与东平台落客区南端接顺,匝道长247.92 m。

DN匝道桥与大铁落客区站台相接处采用简支钢板组合梁,跨径约18.378 m,衔接位置平台宽度为51.458 m,则本跨桥桥宽由32.664 m到50.37 m变化,两端桥宽相差17.8 m。钢板组合梁(由工字形钢板梁与现浇混凝土桥面板组合)呈发散状扇形布置,每片钢板梁梁长均不等,横梁与每片钢板梁相交角度均不等。钢板组合梁分为东西两幅,西半幅设钢板梁9片,东半幅设钢板梁7片,全桥共16片,横断面如图1所示。两幅钢梁相互独立,混凝土桥面板间设置2 cm顺桥向结构缝,结构缝40 cm宽度范围的铺装层采用高性能弹性混凝土材料。钢板组合梁桥位于四合庄西路U型槽上方,下部基础部分与U型槽底板、

收稿日期: 2022-07-28

作者简介: 王犇(1992—),男,硕士,工程师,从事桥梁设计工作。

机非挡墙、隧道闭合框架共构。本文以西半幅钢板组合梁为研究对象进行分析。

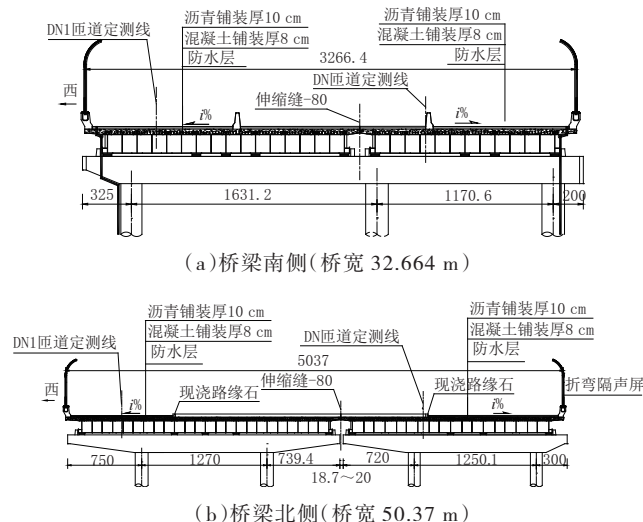


图1 钢板组合梁横断面布置图(单位:cm)

2 有限元模型

本文采用有限元软件 Midas Civil 2021, 为准确分析宽幅异形钢板组合梁各处受力特性, 工字形钢主梁和混凝土桥面板均采用板单元进行模拟, 桥面板采用 C50 混凝土材料, 考虑混凝土收缩徐变特性; 钢主梁采用 Q345 钢。

2.1 计算假设

- (1)忽略混凝土桥面板与钢主梁之间的栓钉连接, 不考虑钢板与混凝土之间的黏结滑移效应。
- (2)混凝土及钢结构均为理想弹性体, 不考虑结构塑性状态, 同时需符合平截面假定的要求。
- (3)混凝土桥面板浇筑起始时间具有初始的材料龄期。
- (4)不考虑混凝土桥面板中钢筋对截面刚度的影响。
- (5)钢结构各构件之间连接没有相对滑移, 有限元模型中共节点创建连接。

2.2 荷载类别

有限元分析过程中考虑结构自重、二期桥面铺装及防撞护栏、二期隔声屏荷载、混凝土收缩徐变、结构整体升降温、桥面板温度梯度及车道活载的作用^[2]。

2.3 边界条件

混凝土桥面板与工字形钢主梁之间剪力钉由刚臂连接, 剪力钉连接件抗剪刚度无限大。支座采用弹性连接, 水平刚度采用 5 000 kN/m, 竖向刚度采用 1 000 000 kN/m。

2.4 施工阶段

阶段一: 工字形钢主梁架设。

阶段二: 浇筑混凝土桥面板。

阶段三: 混凝土桥面板与工字形钢主梁形成组合截面。

阶段四: 施加二期荷载。

阶段五: 收缩徐变 10 a。

阶段六: 成桥阶段。

成桥有限元计算模型如图 2 所示。

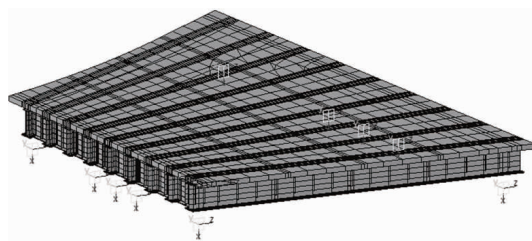


图2 宽幅异形钢板组合梁计算模型

3 结构设计及优化

西半幅钢板混凝土组合梁桥宽由 18.275 m 到 28.448 m 变化, 桥梁跨径约 18 m, 工字形钢主梁发散布置。

3.1 初始结构尺寸确定

受桥梁过宽影响, 西半幅钢板混凝土组合梁需共设 9 片工字形钢主梁, 主梁横向间距 2~3 m 变化, 梁高 1.25 m, 上翼缘厚 20 mm, 腹板厚 16 mm, 下翼缘厚 30 mm; 钢主梁每隔 1 m 设竖向加劲肋, 板厚 14 mm; 钢主梁上设 10 cm 承托及 25 cm 混凝土桥面板, 全桥共高 1.6 m。钢主梁与混凝土桥面板之间预设 4 mm 厚钢模板, 由剪力钉连接, 各钢主梁下翼缘设板式橡胶支座。为保证桥梁结构横向稳定, 结构两端各设与主梁等高端横梁, 跨中平均设三道中横梁, 梁高 0.8 m。钢板组合梁横断面构造如图 3 所示。

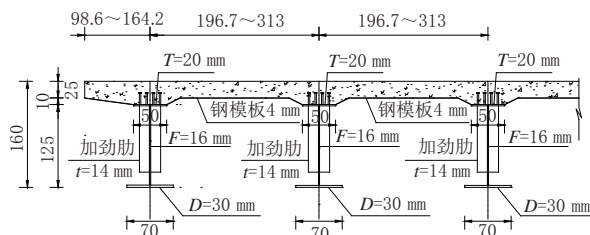


图3 钢板组合梁横断面构造图(单位:cm)

3.2 横隔梁布置优化

中横梁的设置对增加结构整体抗扭刚度和横向刚度作用明显, 虽桥梁宽度较宽, 但桥梁跨径较小, 为确保结构实现经济化和合理化, 中横梁设置个数仍需进行优化比选。一片中横梁与三片中横梁不同

设计情况下,两者结构强度及稳定性对比如图4、图5所示。

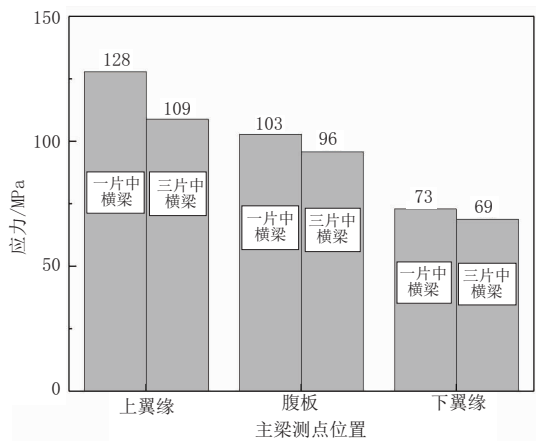


图4 钢主梁应力强度对比

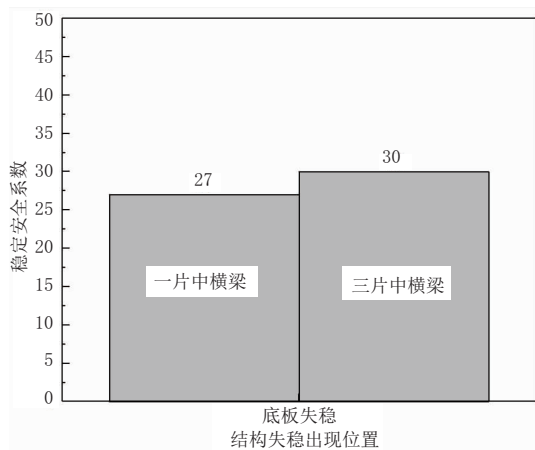


图5 钢板混凝土组合梁屈曲稳定对比

由图4与图5可知,当中横梁的设置个数由三个减少为一个时,钢主梁上翼缘应力强度增加17%,腹板应力强度增加7%,下翼缘应力强度增加5%,结构稳定安全系数降低10%;而在满足钢梁结构“整体稳定性系数大于5”且钢材“设计抗拉、抗弯强度小于270 MPa”的前提下,仅设置单个中横梁,结构安全冗余度仍可满足要求。故遵循桥梁结构安全性和经济性原则,钢板组合梁桥中横梁数量按单个设置进行设计。

3.3 支座布置优化

本桥“宽幅异形”典型的特征,导致桥面板结构不适合采用预制结构,且受施工工期的限制,分段浇筑的施工方法也无法成为现实。因此,本次桥面板采用整体浇筑的施工方式。而主梁在两端设置端横梁,端横梁梁高1.25 m,顶板厚20 mm,底板厚30 mm,腹板厚16 mm;跨中设一道中横梁,中横梁梁高0.8 m,顶板厚16 mm,底板厚16 mm,腹板厚14 mm。在端横梁与中横梁的联系作用下,结构整体刚度大,受混凝土桥面板收缩徐变影响明显,桥面较宽,在混凝土收缩过程中,极易造成混凝土桥面板两侧向内变形,存在将两侧支座上拔的趋势。根据设计要求,不允许桥梁支座出现负反力的情况,故合理对桥梁支座进行布置设计也是本桥的设计重点。本桥支座平面示意如图6所示。

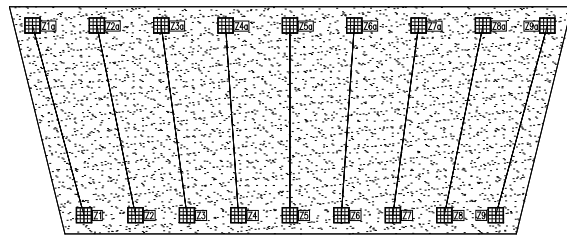


图6 桥梁支座平面示意图

从以下3种不同工况下分析计算桥梁支座的受力状态。

工况一:工字形钢主梁下各设一个板式支座,即设置支座Z1~Z9、Z1a~Z9a。

工况二:工字形钢主梁下间隔设一个板式支座,即设置支座Z1、Z3、Z5、Z7、Z9、Z1a、Z3a、Z5a、Z7a、Z9a。

工况三:工字形钢主梁下间隔两个设一个板式支座,即设置支座Z1、Z4、Z5、Z6、Z9、Z1a、Z4a、Z5a、Z6a、Z9a。

经过计算,得到各工况下支座受力见表1。

表1 各工况支座(min)受力对比分析

单位:kN

工况	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6	Z7	Z8	Z9	Z1a	Z2a	Z3a	Z4a	Z5a	Z6a	Z7a	Z8a	Z9a
工况一	-89.2	371.0	401.1	378.3	371.2	390.5	416.7	361.1	-136.9	-19.4	495.5	482.0	454.7	433.1	448.0	496.2	514.0	-49.3
工况二	78.3	—	792.8	—	794.9	—	808.8	—	-28.4	210.1	—	1 018.1	—	891.8	—	1 030.3	—	182.2
工况三	266.1	—	—	796.3	561.6	805.7	—	—	211.3	466.1	—	—	1 079.3	445.5	1 066.7	—	—	437.5

由表1可知,在工况一和工况二下,桥梁外侧支座容易出现负反力;在工况三下,支座受力满足设计要求。钢板组合梁桥支座布置按工况三进行设计。

4 结构设计及优化

4.1 钢主梁强度分析

(1)主梁正应力

在承载能力极限状态基本组合下,钢主梁各位置正应力强度均应满足^[3]:

$$\sigma \leq \frac{f_d}{\gamma_0} = \frac{270}{1.1} = 245 \text{ MPa}$$

则经计算,钢板组合梁正应力均满足要求,详见表 2。

表 2 基本组合下钢梁各位置正应力计算结果 单位:MPa

位置	最大拉应力	最大压应力	应力限值
钢梁上翼缘板	36.8	-149.1	245
钢梁底板	89.9	-129.8	245
腹板	88.4	-130	245
横隔板	67.5	-153.8	245

(2)主梁剪应力

在承载能力极限状态基本组合下,钢主梁各位置正应力强度均应满足:

$$\tau \leq \frac{f_{vd}}{\gamma_0} = \frac{160}{1.1} = 145 \text{ MPa}$$

由图 7 可知,在基本组合下,钢板组合梁边梁腹板最大剪应力为 56 MPa,满足规范限值要求。

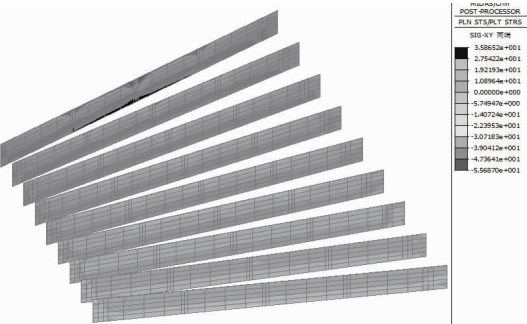


图 7 基本组合下腹板最大剪应力(单位:MPa)

4.2 刚度分析

经计算分析,在活载作用下,主梁挠度如图 8 所示。

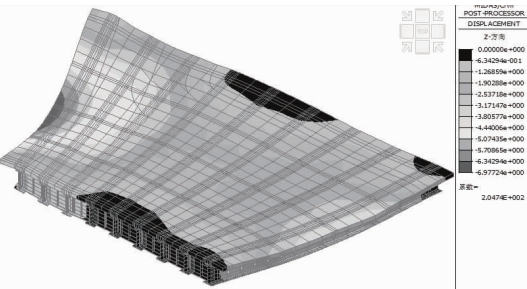


图 8 车辆荷载作用下主梁挠度图(单位:mm)

由图 8 可知,活载作用下,边梁变形最为明显,主梁最大计算挠度为 7 mm,满足规范小于 $L/600=18\,378/600=30 \text{ mm}$ 的规范要求。

4.3 稳定性分析

对成桥后钢板组合梁全桥进行屈曲分析,计算结果如图 9 所示。

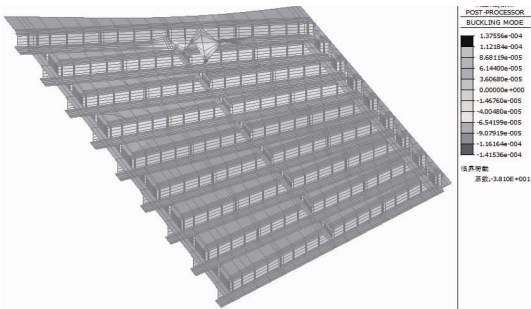


图 9 第一阶屈曲模态

由计算结果可知,钢梁第一阶屈曲模态为边梁底板位置失稳,活载设定为车辆荷载,临界荷载系数为 38.1,满足整体稳定性要求。

4.4 疲劳分析

疲劳荷载计算模型 I,即集中荷载为 $0.7 P_k$,均布荷载为 $0.3 q_k$ 的等效车道荷载。 P_k 和 q_k 根据公路 -I 级车道荷载标准取值。考虑多车道的影响,横向车道布载系数按现行《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60)的相关规定选用^[4]。

正应力取所有单元上/下缘(正应力最大-正应力最小)最大值所对应的 $\sigma_{pmax}, \sigma_{pmin}$ 。

剪应力取所有单元形心(剪应力最大-剪应力最小)最大值所对应的 τ_{pmax}, τ_{pmin} 。

表 3 边梁底板及腹板疲劳验算结果 单位:MPa

位置	σ_{pmax}	σ_{pmin}	τ_{pmax}	τ_{pmin}	疲劳应力	疲劳应力限值	结果
钢梁底板	30	0	—	—	39	74.1	满足
腹板	—	—	12.8	-8.6	27.8	61.5	满足
横隔板	20.9	-2.4	—	—	30.3	59.3	满足

5 结 语

(1)宽幅异形钢板组合梁结构传力路径明确,受力合理,满足要求。在进行前期桥梁方案设计时,需多方面、多工况进行比较,确保结构设计安全、造价经济。

(2)随着钢板组合梁中横梁设置越多,钢主梁结构所受应力越小,结构整体稳定安全系数越高。

(3)宽幅异形钢板组合梁受混凝土收缩影响较大,钢主梁所处位置越向结构外缘,混凝土收缩影响程度越大。为防止结构支座脱空,支座平面布置需进行优化设计。

(4)根据计算结果,宽幅异形钢板组合梁最外侧钢主梁受力最大,长期挠度变化最为明显,且最外侧钢主梁首先出现屈曲失稳,疲劳问题较为敏感。

(下转第 92 页)

副拱肋斜吊杆的初始张拉力分别为 10 kN、250 kN、500 kN、750 kN 和 1 000 kN。由于吊杆初始张拉力对于拱梁组合桥梁来说,是属于体系内部力,不影响成桥后活载作用的内力及变形。因此,只计算主梁跨中及主、副拱肋拱顶在恒载作用下的弯矩及挠度。现将计算结果列于表 10、表 11。

表 10 不同吊杆张拉力对应恒载弯矩值

恒载弯矩 / (kN·m)	主拱吊杆初始张拉力 /kN				
	10	500	1 000	1 500	2 000
主梁跨中	46 242	34 391	22 146	9 897	-2 353
主拱拱顶	2184	4 276	6 450	8 624	10 798
副拱拱顶	613	1 696	2 822	3 948	5 075

表 11 不同吊杆张拉力对应恒载挠度

恒载挠度 / mm	主拱吊杆初始张拉力 /kN				
	10	500	1 000	1 500	2 000
主梁跨中	112.43	92.42	71.79	51.15	30.52
主拱拱顶	73.80	97.71	121.32	145.54	169.76
副拱拱顶	67.28	91.38	116.44	141.51	166.57

根据以上计算结果,随着吊杆初始张拉力的增加,在恒载作用下,主梁跨中弯矩越来越小,直到接近零弯矩的状态,如果继续加大吊杆初始张拉力,主梁跨中将会出现负弯矩。而与此同时,拱肋的弯矩越来越大。从恒载挠度的计算结果也能看到这种趋势。

因此,在设计中应选择合适的吊杆初始张拉力,以使得主梁和拱肋均处于比较良好的受力状态,确保主梁和拱肋的应力状态符合规范要求。

5 结 语

空间钢桁拱与预应力混凝土梁组合体系简支桥结构新颖,外形美观,特别适用于地质条件不好,容

易产生不均匀沉降情况下的城市景观桥梁。本文以广州市从化大桥为例,采用空间有限元分析软件对影响空间钢桁拱稳定性的主要控制因素以及拱与主梁抗弯刚度变化等对结构内力和位移的影响进行了参数分析。得出以下几点结论与建议:

(1)拱肋本身的刚度对空间钢桁拱的整体稳定性影响很大,而横撑及斜撑的刚度大小对空间钢桁拱的整体稳定性影响不是很明显。

(2)在施工过程中,当只有中间吊杆时,空间钢桁拱的整体稳定性较差,不满足规范要求,应设置足够的临时支撑,限制拱肋的侧向位移。

(3)由于相对于预应力混凝土主梁而言,拱肋的刚度相对较小,拱肋所承担的弯矩也较小。因此,在设计中主要考虑主梁的弯矩和应力状态,综合考虑景观因素,中央分隔带的宽度等方面的要求,适当选取拱肋的结构尺寸。

(4)吊杆的初始张拉力对于主梁和空间钢桁拱的受力影响都很大,在设计中应选择合适的吊杆初始张拉力,以使得主梁和拱肋均处于比较良好的受力状态。

参考文献:

- [1] 曾祥林.异型拱梁组合体系桥梁结构行为及施工控制研究[D].成都:西南交通大学,2014.
- [2] 翟晓亮,刘喆,冯云成.新月形拱-连续梁组合体系桥优化分析[J].公路交通科技,2015(3):68-74.
- [3] 周朝阳,李伟平.长丰桥异型组合拱圈安装施工技术[J].市政技术,2010(5):41-44.
- [4] 韩洪举,张基进.大跨度钢筋混凝土拱桥施工阶段动力特性分析[J].中外公路,2020,40(5):165-167.
- [5] 王胜杰.尼尔森体系钢管混凝土系杆拱桥拱肋稳定性及系梁横向受力研究[D].兰州:兰州交通大学,2017.

(上接第 87 页)

参考文献:

- [1] 张海.42 m 简支多主梁活载组合钢板梁有限元分析[J].交通与运输,2019,35(4):31-34.
- [2] 黄玲.钢板组合梁桥结构受力分析[J].桥梁建设,2020,50(S2):48-54.

- [3] 杨松,席进.三维梁格有限元计算方法在钢板组合梁结构计算中的应用[J].工程与建设,2017,31(4):484-486.
- [4] 刘青茹,吉伯海,姚悦,等.钢板组合梁桥主梁与竖向加劲肋连接细节疲劳应力特征[J].南京工业大学学报(自然科学版),2021,43(3):381-389.