

大跨径波形钢腹板预应力混凝土箱梁桥设计与研究

施智, 罗吉智, 彭蓉

(广西交通科学研究院有限公司, 广西 南宁 530007)

摘要:该文首先简要介绍了国内外对波形钢腹板桥梁的研究和应用情况,以及该类桥梁的结构特点。再结合具体的大跨径波形钢腹板箱梁桥的设计实例,详细介绍其设计参数的取用,计算结果及分析,以及与传统混凝土箱梁桥的经济性比较等,以说明该桥型方案的可行性和优越性。

关键词:波形钢腹板;里衬混凝土;钢腹板失稳;体外预应力

预应力混凝土连续刚构(或连续梁)桥是中国公路大跨径桥梁中应用最广泛的桥型,该类桥型结构简单、施工方便、养护容易、造价较低,在跨径不超过200 m的范围内最具竞争力。

然而,多年工程建设实践表明:普通大跨径预应力混凝土连续刚构、连续梁桥存在两类主要工程病害:①箱梁混凝土腹板开裂;②主梁跨中持续下挠。究其原因主要是混凝土腹板抗剪、抗拉强度不足,而不断地加厚腹板则会导致结构过重,受力不合理,也不经济。大跨径波形钢腹板PC箱梁桥则是通过采用波形钢腹板取代传统的混凝土腹板,有针对性地改善普通大跨径预应力混凝土箱梁桥的这两项弊病。

波形钢腹板组合截面桥梁的结构形式多种多样,限于篇幅,该文仅谈及应用于连续刚构、连续梁桥型的波形钢腹板预应力混凝土组合截面箱梁桥(以下简称“波形钢腹板PC箱梁桥”,跨径 ≥ 100 m的称为“大跨径”)的可行性和优势。

1 当前应用概况

波形钢腹板PC箱梁桥源于法国,1986年首座波形钢腹板桥梁在法国建成,距今已近40年。而该桥型得到广泛应用的却是在日本。随着日本大量波形钢腹板PC箱梁桥的建成,使其在该类桥型的设计建造水平处于领先地位,日本相继出台了相关的设计及施工规范、标准、指南、手册等,不断地完善了波形钢腹板PC箱梁桥的技术理论。

中国对波形钢腹板PC箱梁桥的研究起步于20世纪90年代中期,而设计建造始于21世纪初,2005年1月,中国建成第一座波形钢腹板PC箱梁人行桥。近10多年来,波形钢腹板PC箱梁桥在中国公路及市政桥梁中得到了一定的应用,已建和在建的桥梁有百余座。

目前世界最大跨径的波形钢腹板PC箱梁桥是日

值整体较未设置的增幅大。加劲肋技术可增加钢波纹板的强度和刚度,确保钢波纹板拱桥的安全稳定。

参考文献:

- [1] 胡滨,梁养辉,刘百来,等.公路钢波纹板拱桥受力特征分析[J].中外公路,2020(4).
[2] 方诗圣,方正东,黄志福.车辆荷载作用下多孔钢波纹板桥的稳定性分析[J].中外公路,2016(6).

- [3] 纳启财,胡滨,梁养辉,等.多年冻土区钢波纹管涵洞应变测试及效益分析[J].筑路机械与施工机械化,2015(9).
[4] 王晋斌.钢波纹板—混凝土组合截面拱涵的监测与分析[J].山西交通科技,2020(2).
[5] 高君,刘东东,梁养辉,等.钢波纹板桥梁薄板加强技术有限元分析[J].山东交通科技,2019(3).
[6] 张仕艳,陈剑,王军,等.钢波纹管涵在喀斯特地貌公路工程中的应用研究[J].山东交通科技,2018(6).

本安威川桥,最大主跨径为 179 m,中国有很多普通预应力混凝土连续刚构、连续梁桥的跨径超过了这个跨径。而中国已建成的波形钢腹板 PC 箱梁桥主要跨径范围为 50~150 m,目前中国在建的波形钢腹板 PC 箱梁桥最大跨径为 160 m,未来可在更大的跨径上做些尝试。大跨径波形钢腹板 PC 箱梁桥在日本和中国也建造了很多,从目前运营的情况看,没有发现存在明显的结构通病,且该桥型的理论研究及使用经验正日趋成熟。因此,结合目前的使用情况,可认为大跨径波形钢腹板 PC 箱梁桥是值得推广应用的一种桥型。

2 结构特点

波形钢腹板 PC 箱梁桥是由混凝土顶底板与波形钢腹板组成的组合结构,可以认为是普通预应力混凝土箱梁桥衍生出来的一种新结构,所以整体结构受力特性与普通混凝土箱梁桥相似。但也有其不同特点:

(1) 采用波形钢腹板代替混凝土腹板,结构自重可减轻达 20%。但对于大跨径的连续梁桥,由于在主墩附近的波形钢腹板内侧,设置了为防钢板失稳屈曲的里衬混凝土段,故整体结构自重减轻仅为 10% 左右;但减轻的部位集中在跨中,所以对主梁弯矩的减小效果很明显。上构自重减轻的另一好处,可以减少下构工程量,降低造价。

(2) 由于波形钢腹板纵向伸缩刚度很小可以忽略,所以波形钢腹板 PC 箱梁受力明确:轴向力基本由混凝土顶、底板承担,剪力基本由波形钢腹板承受(87%左右)。由于没有腹板的约束,张拉顶底板预应力的效率明显提高,且顶底板的收缩徐变变形不会向腹板转移,从而避免了传统混凝土箱梁腹板斜向开裂的通病,进而也减少跨中下挠。

(3) 对于大跨径波形钢腹板 PC 箱梁桥,一般在箱

内设置若干体外预应力束,以提高结构的抗弯、抗剪承载力,并有利于减少跨中下挠。

(4) 相对于普通预应力混凝土箱梁,波形钢腹板 PC 箱梁的截面抗扭刚度下降约 60%。对大跨径波形钢腹板 PC 箱梁桥,可通过在箱内设置若干道横隔板来解决这不利影响,同时部分横隔板亦作为体外束转向机构使用。

(5) 由于波形钢腹板 PC 箱梁结构较轻巧,采用悬臂浇筑施工时节段可以更长一些;而且采用钢腹板后减少了钢筋的绑扎量和混凝土的浇筑量,从而有效缩短工期;另外,利用钢腹板作承重构件进行悬臂浇筑施工(简称“RW 工法”)(图 1),可以显著减小挂篮尺寸和重量,轻巧的挂篮加设计行走装置后,可在钢腹板顶自由行走,使施工更方便,工期更短。

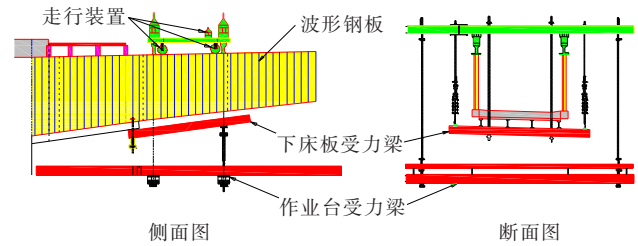


图 1 波形钢腹板 PC 箱梁桥悬臂施工 RW 工法示意图

3 工程设计实例

3.1 工程概况

龙马红水河特大桥是广西某高速公路上的一座桥梁。桥梁总长 634.08 m,主桥为双幅(95+180+95) m 的连续刚构桥。为便于研究和比较,对该主桥先后作了波形钢腹板 PC 箱梁桥和普通预应力混凝土箱梁桥两种方案同深度的施工图设计。图 2 为波形钢腹板 PC 箱梁桥方案的桥型立面图。

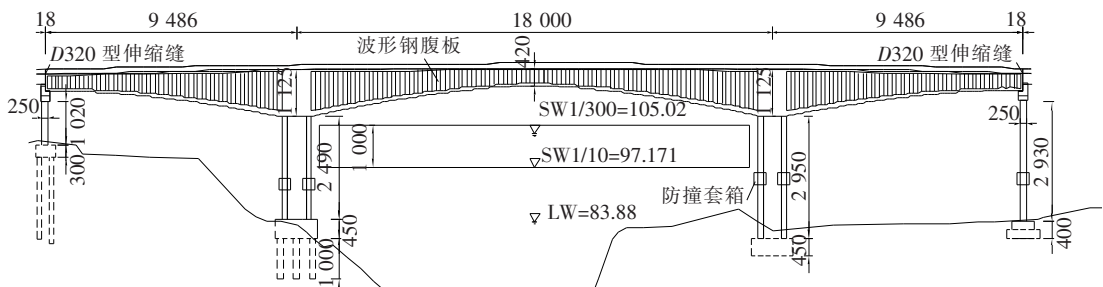


图 2 龙马红水河特大桥波形钢腹板 PC 箱梁桥方案桥型立面图(单位:cm)

3.2 主要设计参数

(1) 主梁结构尺寸。大跨径波形钢腹板 PC 箱梁

桥抗弯刚度比普通混凝土箱梁下降约 10%,但结构自重也减轻 10% 左右,所以其主梁梁高可以取与普通预

应力混凝土连续刚构桥一致或略高。该方案的主墩支点梁高采用 11.25 m, 跨中梁高采用 4.2 m; 支点梁高 $h_{支} = L/16$, 跨中梁高 $h_{中} = L/43$, 比普通预应力混凝土箱梁的梁高略高。

(2) 大跨径波形钢腹板 PC 箱梁桥的顶、底板厚度与普通预应力连续箱梁基本相当。该方案的箱梁顶板厚度采用 34 cm (考虑横向受力需要), 跨中处底板厚度采用 30 cm, 支点处底板厚度采用 120 cm。大跨径波形钢腹板 PC 箱梁断面见图 3。

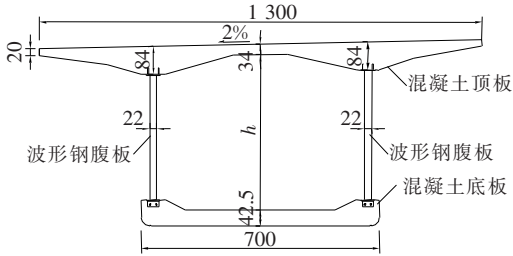


图 3 大跨径波形钢腹板 PC 箱梁断面图 (单位: cm)

(3) 波形钢腹板一般由卷材或板材弯折而成, 通常桥梁中采用的波形钢腹板是等波长的, 按波长将波形钢腹板分类, 1600 型是目前中国厂家生产的最大型号, 主要用于大跨径桥梁。该方案采用 1600 型波形钢腹板, 即波长为 1.6 m; 主梁支点处波形钢腹板高度达 8.92 m, 钢板厚度采用 30 mm; 跨中处高度为 2.78 m, 钢板厚度采用 12 mm; 中间区段钢板厚度采用 14、22、28 mm 过渡。钢板材料采用耐候钢, 无需防腐涂装, 正常环境寿命可达 50 年以上。

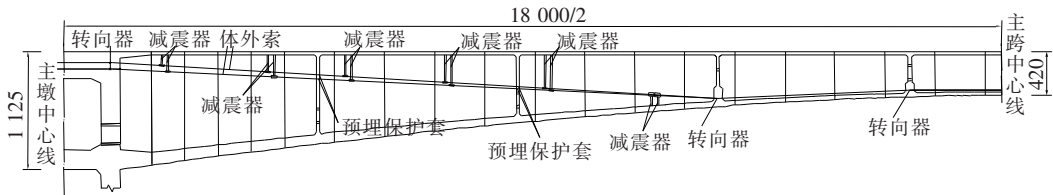


图 4 大跨径波形钢腹板 PC 箱梁桥体外预应力束布置示意图 (单位: cm)

3.3 主要计算结果

大跨径波形钢腹板连续刚构桥与普通混凝土连续刚构桥的计算内容基本一致, 其不同之处在于钢腹板的计算。根据波形钢腹板桥的结构特点, 主要从以下几方面来进行结构验算。

(1) 主梁抗弯承载力

与普通混凝土连续刚构桥的验算方法一致, 重点验算主墩支点处和中跨跨中处的主梁正截面抗弯承载力 (表 1)。

从表 1 可知: 主梁主墩处及中跨跨中处的正截面

(4) 大跨径波形钢腹板 PC 箱梁桥要在主墩支点附近设置一段里衬混凝土, 其一是为了使波形钢腹板与支点 0# 块混凝土之间应力传递均匀; 其二是为了防止波形钢腹板的屈曲。对于防止钢腹板屈曲, 经验做法是超过 5 m 高的波形钢腹板均要设里衬混凝土。该方案的里衬混凝土段长度为 20.5 m, 最厚平均厚度 (取波形钢腹板波峰、波谷处两者的平均值) 为 115 cm, 最薄平均厚度为 35 cm。该方案不设里衬混凝土的波形钢腹板最大高度为 6.633 m, 比上述经验值 (5 m) 略高, 但屈曲验算仍可满足要求。方案在钢腹板屈曲失稳满足要求的前提下, 通过适当减小里衬混凝土长度来减轻结构自重。

(5) 大跨径波形钢腹板 PC 箱梁桥的顶、底板体内预应力束的布置, 与普通预应力混凝土连续箱梁桥基本一致; 由于没有混凝土腹板, 故无体内腹板下弯束。因此, 为提高主梁整体抗剪能力, 增加墩顶正截面强度, 减小跨中下挠, 需设置一些体外预应力束, 形成体内、体外预应力并用的方式。一般体内预应力主要用来承担恒载效应, 而体外预应力则主要用来抵抗活载效应。体外预应力束可定期更换, 对抑制主梁跨中持续下挠十分有利。该方案的体内预应力顶板束采用 $19\phi^{*}15.2$ 和 $22\phi^{*}15.2$ 两种规格的钢绞线束, 顶板合龙束采用 $19\phi^{*}15.2$; 中跨底板束采用 $17\phi^{*}15.2$, 边跨底板束采用 $15\phi^{*}15.2$ 。体外预应力束均采用 $22\phi^{*}15.2$ 的钢绞线束, 其中中跨用 6 束, 边跨用 4 束, 并且每跨留有 2 束的备用孔 (图 4)。

表 1 主梁正截面抗弯承载力主要计算结果

截面位置	弯矩组合设计值/ (kN · m)	抗弯承载力值/ (kN · m)
主墩支点处	1 899 180	2 517 691
中跨跨中处	234 195	270 128

抗弯承载力满足规范要求, 并略有富余。其余截面也均满足规范要求。

(2) 主梁抗剪承载力

波形钢腹板刚构桥抗剪计算分纯钢腹板梁段和设

里衬混凝土钢腹板梁段两种情况:①纯钢腹板梁段,假定剪力全由波形钢腹板承担且剪力均匀分布;②里衬混凝土钢腹板梁段,考虑钢腹板和里衬混凝土共同承担剪力。

根据计算结果,纯钢腹板梁段最不利的抗剪截面是边跨 $3L/4$ 截面和边跨 $L/2$ 截面,均满足承载力要求。具体结果见表 2。

表 2 波形钢腹板梁段抗剪承载力验算结果

截面位置	抗剪承载力/kN	剪力最大值/kN	剪力最小值/kN
边跨 $L/2$	±29 454	20 079	13 007
边跨 $3L/4$	±60 901	38 385	27 649
中跨 $L/8$	±61 158	-29 776	-40 960
中跨 $L/4$	±30 303	-17 450	-25 332
中跨跨中	±11 676	1 741	-1 744

而里衬混凝土钢腹板梁段由于有里衬混凝土的参与,其抗剪承载力明显富余很多。具体结果见表 3。

(3) 主梁抗裂验算

主梁按全预应力混凝土构件设计,根据行业设计规范(JTG 3362—2018)要求,按以下公式进行主梁正截面抗裂验算:

$$\sigma_{st} - 0.80\sigma_{pe} \leq 0 \quad (1)$$

主要控制截面正常使用极限状态截面抗裂验算结果见表 4。

表 3 里衬混凝土波形钢腹板梁段抗剪承载力验算结果

截面位置	抗剪承载力/kN	剪力最大值/kN	剪力最小值/kN
中支点左右截面	±126 172	55 597	41 350
中支点左右截面	±126 438	-43 504	-58 147

从表 4 可知:按规范进行抗裂验算,主梁上下缘均未出现拉应力,符合全预应力构件要求,最小压应力在

表 4 主要控制截面正常使用极限状态截面抗裂验算结果

截面位置	$(\sigma_{st} - 0.80\sigma_{pe})/\text{MPa}$	
	上缘	下缘
边跨 $L/4$	3.1	9.9
边跨跨中	3.2	10.4
中支点	1.0	13.3
中跨 $L/4$	2.8	10.1
中跨跨中	8.8	1.3

注:“+”表示压应力。

主墩墩顶处,为 1.0 MPa,表明全桥主梁有一定的应力安全储备。

(4) 混凝土最大压应力

根据规范(JTG 3362—2018)要求,按以下公式进行主梁受压区混凝土的最大压应力验算:

未开裂构件:

$$\sigma_{kc} + \sigma_{pt} \leq 0.5f_{ck} \quad (2)$$

该方案主梁混凝土采用 C60, $0.5f_{ck} = 19.25$ MPa。受压区混凝土最大压应力计算结果见表 5。

表 5 受压区混凝土最大压应力计算结果

截面位置	$(\sigma_{kc} + \sigma_{pt})/\text{MPa}$	
	上缘	下缘
边跨 $L/4$	4.1	12.0
边跨跨中	13.6	7.8
中支点	16.6	10.8
中跨 $L/4$	13.7	8.0
中跨跨中	11.0	1.9

注:“+”表示压应力。

从表 5 可知:主梁受压区混凝土最大压应力值为 16.6 MPa,小于 $0.5f_{ck} = 19.25$ MPa,满足规范要求,且有一定的安全富余。

(5) 挠度验算

根据规范(JTG 3362—2018)要求,消除结构自重产生的长期挠度后,主梁在汽车(不计冲击力)和人群荷载频遇组合作用产生的最大挠度不应超过计算跨径的 $1/600$ 。具体挠度计算结果见表 6。

表 6 挠度验算结果

位置	挠度/mm					挠度长期增长系数	短期效应组合长期挠度/mm	容许值/mm	是否满足要求
	收缩徐变	汽车活载	整体温差	温度梯度	基础沉降				
边跨跨中	3.9	-7.9	-3.8	-0.5	-5.2	1.4	-11.5	±167	是
中跨跨中	-31.4	-34.7	-15.9	-6.7	-5.7	1.4	-110.6	±300	是

(6) 钢腹板屈曲验算

波形钢腹板一般都很薄,所以稳定性验算是重要的验算内容。一般应考虑局部屈曲、整体屈曲及合成屈曲 3 种失稳模态。理论公式及符号意义可参考文献[1],表 7 为主桥钢腹板屈曲验算结果。

从表 7 可以看出:合成屈曲控制结构安全,而最不利的截面为中跨 $L/4$ 截面,其最小安全系数为 1.4, ≥ 1 ,满足要求。

(7) 波形钢腹板与顶底板连接抗剪验算

波形钢腹板与顶板采用翼缘型 Twin-PBL 剪力键连接方式,与底板采用翼缘型角钢剪力键连接方式。

由于国家标准未颁布,因此参考了广东省地方标准 DB 44/T 1393—2014《波形钢腹板预应力混凝土组合箱梁桥设计与施工规程》来验算连接件的抗剪承载力,公式如下:

$$\gamma_0 V_{sd} \leq V_{pud} \quad (3)$$

式中: V_{sd} 为对应顶板连接为翼缘型 Twin-PBL 剪力键开孔板的单孔水平设计剪力,对应底板连接为一处角钢剪力键的水平设计剪力; V_{pud} 为顶板(或底板)连接件单孔(或每处)的水平抗剪承载力设计值。

波形钢腹板与顶、底板连接抗剪承载力验算结果见表 8。

表 7 承载力设计荷载作用下波形钢腹板剪切屈曲验算结果

截面位置	荷载剪应力 $\tau_u /$ MPa	局部屈曲临界应力 $\tau_{cr,L} /$ MPa	整体屈曲临界应力 $\tau_{cr,G} /$ MPa	合成屈曲临界应力 $\tau_{cr,1} /$ MPa	最小安全系数	是否满足
边跨 $L/4$	75.1	205	205	172.4	2.3	是
边跨跨中	102.8	205	205	172.4	1.7	是
边跨 $3L/4$	94.9	205	187	163.9	1.7	是
中跨 $L/8$	101.1	205	187	163.9	1.6	是
中跨 $L/4$	126.8	205	205	172.4	1.4	是
中跨跨中	26.1	205	205	172.4	6.6	是

表 8 波形钢腹板与顶、底板连接抗剪承载力验算结果

截面位置	与顶板连接			与底板连接		
	$\gamma_0 V_{sd} / \text{kN}$	V_{pud} / kN	是否满足	$\gamma_0 V_{sd} / \text{kN}$	V_{pud} / kN	是否满足
边跨端支点截面	159	429	是	321.16	1 130.67	是
边跨 $L/4$ 截面	150	477	是	254.69	1 130.67	是
边跨跨中截面	321	572	是	614.90	1 130.67	是
边跨 $3L/4$ 截面	390	668	是	815.00	1 130.67	是
中支点左截面	452	668	是	997.84	1 130.67	是
中支点右截面	460	668	是	1 010.06	1 130.67	是
中跨 $L/8$ 截面	398	668	是	787.12	1 130.67	是
中跨 $L/4$ 截面	391	620	是	739.07	1 130.67	是
中跨跨中截面	52	429	是	80.60	1 130.67	是

由表 8 可以看出:波形钢腹板与箱梁混凝土顶、底板连接处抗剪承载力满足规范的要求,其中最大剪力均出现在主桥中支点附近。

该方案还进行了桥梁其他项目的验算,验算结果均满足规范要求,不再一一列出。

3.4 经济比较

大跨径波形钢腹板 PC 箱梁桥因腹板用钢量较

大,所以其工程造价受市场钢材价格影响较大。表 9 为该桥主桥波形钢腹板与普通混凝土腹板箱梁方案的设计预算数据比较。

由表 9 可知,就主桥而言,波形钢腹板连续刚构方案比普通预应力混凝土连续刚构方案费用高 4.6% 左右;如果钢材价格低时,则波形钢腹板方案的造价会低些;由于有一岸岩石裸露,有两个桥墩基础采用明挖扩

表9 主桥两种方案设计主要经济指标对比

方案	上部结构			下部结构		建安费/ 万元	经济指标/ (元·m ⁻²)	施工工 期/d
	混凝 土/m ³	预应力 钢材/t	钢材(耐 候钢)/t	混凝土/m ³				
波形钢腹板连续刚构	14 782.6	819.3	1 918.2	15 731.6	11 201.42	11 424.2	670	
预应力混凝土连续刚构	16 994.5	2 713.1	—	15 928.1	10 689.03	10 901.6	730	

大基础,波形钢腹板方案减轻的恒载重量对减少基础工程数量的作用未能充分体现,如在地基覆盖层较深需要采用摩擦群桩基础时,则作用明显;另外波形钢腹板方案采用的施工挂篮重量仅为传统挂篮的1/2,其带来的经济效益在对比表中也未能充分体现。总体而言,可以认为该桥的波形钢腹板连续刚构方案与普通预应力混凝土连续刚构方案的造价基本相当,但施工工期能够节省60个工作日,具有明显的时间效益。

3.5 设计小结

该桥主跨为180 m的连续刚构,采用波形钢腹板PC箱梁桥的方案,各项力学指标均能满足有关规范要求,且施工工期较普通混凝土连续刚构桥明显缩短,造价基本相当,因此方案相对更优。

4 思考与探索

通过大跨径波形钢腹板PC箱梁桥的设计实践,提出如下思考:

(1) 根据中国有关研究,波形钢腹板连续刚构(或连续梁)桥最大跨径可达310 m。如果要实现更大跨径的突破,现有的波形钢腹板型号不足以胜任,建议厂家进行更大尺寸(如2400型)波形钢腹板的研发,以备将来之需。

(2) 里衬混凝土段的设置长度,也是制约大跨径波形钢腹板PC箱梁发展的重要问题。按以往控制钢腹板高度的经验方法来设置里衬混凝土段,会很长;结构自重减轻不明显,经济性变差。为此,下一步需要对里衬混凝土段的设置做更多的研究。初步的几个想法:① 钢腹板采用加劲肋提高抗屈曲能力;② 采用高强、轻质新材料,减薄、减轻里衬混凝土段;③ 只在钢腹板部分高度范围内设里衬混凝土。

(3) 对于更大跨径的波形钢腹板连续梁桥,体外束和体内束的设置比例是一个值得研究的问题。体外束可减小主梁跨中下挠,定期更换能有效解决预应力损失的问题;但需要转向和减振装置,且更换时对交通有一定影响。日本有些工程师倾向于多设体外束,利

于更换。而中国目前的做法是体内束设置多一些,让体内束承担所有恒载的内力。因此对这个设置比例问题值得进一步研究。

5 结语

波形钢腹板PC箱梁桥的应用已有30多年,特别在日本应用广泛,理论体系和相关规范较完备,工程实践日趋成熟,应用于大跨径梁桥的实例也很多,目前没有发现明显结构通病。在中国,近些年来也逐步推广应用,但总体数量不多,跨径不大,与中国在这方面的理论体系不够完善和相关经验不足有关。

该文结合实桥的设计实践,对该桥型进行了较深入的研究和探讨。希望能为波形钢腹板PC箱梁桥向更大跨径的方向发展提供有益的经验借鉴。

参考文献:

- [1] 刘玉擎,陈艾荣.组合折腹桥梁设计模式指南[M].北京:人民交通出版社股份有限公司,2015.
- [2] 陈宜言.波形钢腹板预应力混凝土桥设计与施工[M].北京:人民交通出版社,2009.
- [3] 王会利,谢常领,秦洒凤,等.中国连续刚构桥的调查与分析[J].中外公路,2019(2).
- [4] 李淑琴,万水,张长青.波形钢腹板设计与制造[M].北京:人民交通出版社,2011.
- [5] 姚红兵,王思豪,刘玉擎,等.组合折腹梁桥钢腹板自承重施工过程分析[J].中外公路,2018(3).
- [6] 李淑琴,万水,乐斐.波形钢腹板PC组合箱梁桥结构分析与实例[M].北京:人民交通出版社,2015.
- [7] 胡建华,刘海波,狄谨.波形钢腹板PC组合箱梁扭转性能分析[J].中外公路,2017(3).
- [8] 项海帆,肖汝诚,徐利平.桥梁概念设计[M].北京:人民交通出版社,2011.
- [9] 乔朋,狄谨,秦凤江.单箱三室波形钢腹板PC组合箱梁的受力性能研究[J].中外公路,2016(5).
- [10] 张东升,付建新.波形钢腹板PC组合箱梁研究现状[J].江苏建筑,2012(4).