

文章编号: 0451-0712(2005)07-0045-09

中图分类号: U448.213

文献标识码: B

# 波形钢腹板 PC 箱梁桥应用综述

陈宝春, 黄卿维

(福州大学土木建筑工程学院 福州市 350002)

**摘 要:** 介绍了波形钢腹板 PC 箱梁桥在国外的应用发展概况, 给出了国外波形钢腹板 PC 箱梁桥的一览表。对这种新桥型的构造要点、结构特点进行了阐述。结合部分典型桥例, 对该桥型的最新发展趋势进行了介绍, 最后展望该类型桥梁在国内的应用前景。

**关键词:** 波形钢腹板; 箱梁桥; 应用

波形钢腹板 PC 箱梁桥是 20 世纪 80 年代出现的一种新型桥梁, 由于它的结构自重较轻, 可以减少下部结构的工程量, 进而降低其工程总造价, 而且, 作为腹板的波形钢板具有不抵抗轴向力的特点, 可使预应力有效地加载于混凝土翼缘板, 提高了预应力的效率。另外, 它在施工过程中, 可以减少大量的模板、支架和混凝土浇注工程, 免除在混凝土腹板内预埋管道的烦杂工艺, 从而方便了施工, 缩短了工期。正因为波形钢腹板 PC 箱梁桥具有如此优越的结构受力和施工性能, 可获得良好的经济效益, 所以它在国外发展得很快, 特别是在日本, 已建和在建的波形钢腹板预应力桥梁就达 30 余座。国内由于各种原因, 目前还没有该类型桥梁的工程实例。本文对该桥型的发展概况、构造要点以及结构特点进行了介绍, 并结合部分国外典型实桥, 对该桥型在我国的应用

发展前景进行了讨论, 希望能引起桥梁工作者更为广泛的关注, 促进该桥型在我国的桥梁建设中得到应用。

## 1 发展概况

预应力混凝土 (PC) 箱梁是现代大跨径桥梁常用的结构形式。然而, 随着跨径的增大, 其自重也迅速增大, 影响了跨越能力和经济性。分析箱梁的截面构成可知, 箱梁顶底板受到结构受力和施工性能的制约, 通过减薄其板厚达到减小自重的潜力很小, 而占总截面面积 25%~30% 的腹板的减小还有较大的空间。经过多年的研究, 法国学者于 20 世纪 80 年代提出了用轻质高强的钢板代替厚重的混凝土腹板, 并配以体外预应力索的设想, 随后根据这一设想修建了首座采用加劲平钢腹板的 PC 组合箱梁桥——

收稿日期: 2004-12-01

## Load-Tracking Research and Simulation on Synchronous Lowering of Sutong Bridge Pier Caisson About 5 800 Tons Under Water

BIAN Yong-Ming, QIN Li-Sheng, ZHOU Xian-Zhou

(Mechanical Engineering College, Tongji University, Shanghai 200090, China)

**Abstract:** To lower the Sutong bridge pier caisson about 5 800 tons under water is a key point of this project. Due to great vertical rigidity and overall arrangement, it is difficult to control the lowering process. It will affect the safety of the structure if load is not well controlled. The load-tracking approach on Sutong project is described and system simulation is presented too in this papers.

**Key words:** caisson; load-tracking; synchronous lowering

Ferte-Saint-Aubin 桥,如图1 所示。但在该桥设计中发现,由于钢板与混凝土的变形量相差较大,平钢腹板对箱梁顶、底混凝土板在桥轴方向的变形产生较大的约束,从而造成混凝土截面的预应力严重损失。为解决平钢腹板箱梁这一致命的缺点,法国学者 Pierre Thrivans 提出将原来的平钢板改为沿桥轴方向可伸缩的波形钢板,由此而形成了一种新型的、结构受力更合理的箱梁结构——波形钢腹板PC 组合箱梁,见图2 所示。由于几毫米厚的钢板就能承担数十厘米厚混凝土所能抵抗的剪力,而钢板重量亦仅为混凝土板的1/20 左右,这样就能有效地减轻结构的重量,从而实现了桥梁的轻量化,使其具有更大的跨越能力。

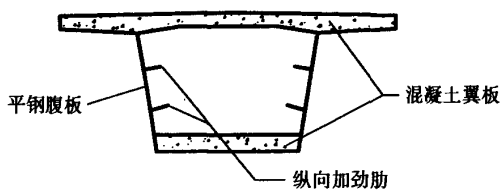


图1 Ferte-Saint-Aubin 桥横断面

第一座采用波形钢腹板PC 组合箱梁结构的桥梁是法国 Campenon Bernard(简称CB)公司于1986

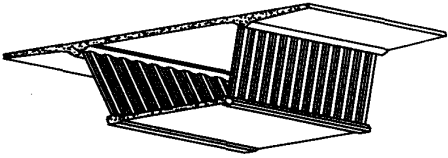


图2 波形钢腹板箱梁

年修建的 Cognac 高架桥,随后法国又先后建成了 Maupre 桥、Asterix 桥和 Dole 桥三座此类桥梁。

日本在 20 世纪 80 年代末从法国引进波形钢腹板PC 组合箱梁桥技术,并进行全方位的研究,PS 株式会社于 1993 年修建了其国内的第一座波形钢腹板PC 简支梁桥——新开桥,随后又建造了银山御幸桥、本谷桥、日见桥以及矢作川桥等一系列桥梁,其中有连续梁桥、连续刚构桥、部分斜拉桥和斜拉桥,不仅拓宽了该类型桥的使用范围,还发展了其设计和施工技术,取得了较为丰硕的成果。另外,其他国家如挪威、委内瑞拉、德国以及韩国也将波形钢腹板PC 组合箱梁结构这一新颖结构应用于其桥梁建设中。表1 给出了国外已建、在建的波形钢腹板PC 组合箱梁桥的情况。

表1 波形钢腹板PC 箱梁桥<sup>[3~11]</sup>

序号	桥名	结构形式	跨径布置或桥梁长度/m	建成年份/年
1	法国 cognac 桥	3 跨连续梁	31.0+43.0+31.0	1986
2	法国 maupre 桥	7 跨连续梁	41.0+47.3+53.6+50.4+47.3+44.1+41.0	1987
3	法国 asterix 桥	2 跨连续梁	37.0+37.0	1989
4	法国 dole 桥	7 跨连续梁	48.0+5×80.0+48.0	1994
5	挪威 tronko 桥	2 跨悬臂边跨+1 跨简支中跨	—	—
6	委内瑞拉 caracas 桥	4 跨连续梁	—	—
7	韩国 이륜스 桥	14 跨连续梁	50.0+10×60.0+50.0+2×50.5	—
8	德国 Altwipfergrund 桥	3 跨连续梁	北线 81.5+115.0+81.4 南线 84.6+115.0+80.5	2001
9	日本新开桥	单跨简支梁	30.0	1993
10	日本银山御幸桥	5 跨连续梁	27.4+3×45.5+44.9	1996
11	日本本谷桥	3 跨连续刚构	44.0+97.2+56.0	1998
12	日本锅田高架桥	3 跨连续梁	47.0+91.5+47.0	2000
13	日本中子沢桥	2 跨连续梁	47.8+47.5	2001
14	日本小河内川桥	2 跨 T 形刚构	78.5+78.5	2001
15	日本白沢桥	单跨简支梁	50.0	2001
16	日本小犬丸川桥	6 跨连续刚构	49.9+4×81.0+54.1	2001
17	日本前谷桥	2 跨 T 形刚构	上行线 77.3+84.3 下行线 75.3+83.3	2001
18	日本胜手川桥	3 跨连续刚构	59.3+96.5+69.8	2001

续表

序号	桥名	结构形式	跨径布置或桥梁长度/m	建成年份/年
19	日本锅田西高架桥	3 跨连续刚构	59.0+125.0+59.0	2001
20	日本大内山川第二桥	7 跨连续刚构	49.0+2×66.0+120.0+57.0+43.0+34.0	2002
21	日本中野高架一桥	4 跨连续梁	48.0+70.5+81.5+50.8	2002
22	日本中野高架二桥	4 跨连续梁	57.5+83.9+60.5+39.8	2002
23	日本津川桥	4 跨连续刚构	69.1+112.0+142.0+130.6	2002
24	日本下田桥	4 跨连续刚构	44.3+136.5+48.9+38.4	2002
25	日本谷川桥	单跨简支梁	49.7	2002
26	日本安家 4 号桥	2 跨连续梁	55.8+55.8	2002
27	日本栗谷川桥	4 跨连续刚构	44.0+81.0+95.0+58.0	2002
28	日本鹤卷桥	4 跨连续刚构	36.1+2×47.0+36.1	2003
29	日本门崎桥	4 跨连续刚构	41.2+2×50.0+41.2	2003
30	日本白岩桥	3 跨连续梁	上行线 52.0+86.0+45.0 下行线 54.0+82.0+51.0	2003
31	日本日见桥	3 跨部分斜拉桥	91.8+180.0+91.8	2003
32	日本温海川桥	4 跨连续梁	62.3+2×51.5+51.3	2004
33	日本黑部川 B 桥	6 跨连续梁	2×50.0+2×72.0+2×50.0	2004
34	日本第二上品野桥	5 跨连续梁	上行线 68.0+81.0+2×73.0+50.0 下行线 65.0+81.0+2×73.0+51.2	2004
35	日本长谷川桥	5 跨连续刚构	58.8+3×92.0+58.5	2004
36	日本游乐部川桥	3 跨连续梁	65.7+102.5+65.9	2004
37	日本津久见川桥	5 跨连续刚构	49.6+2×75.0+47.0+42.6	2004
38	日本矢作川桥	4 跨复合斜拉桥	174.7+2×235.0+174.7	2004
39	日本豊田东 JCT.Cランプ桥	3 跨连续刚构	86.0+94.0+61.9	2004
40	日本広内第二桥	5 跨连续梁	40.9+75.0+85.0+50.0+39.4	2004
41	日本长井ダム11号桥	3 跨连续刚构	45.9+72.0+45.9	2004
42	日本信楽六号桥	2 跨 T 形刚构	71.8+77.8	2004
43	日本信楽七号桥	5 跨连续刚构	57.5+3×89.0+57.5	2004
44	日本栗东桥	4 跨(5 跨)部分斜拉桥	上行线 137.6+170.0+115.0+67.6 下行线 152.6+160.0+75.0+90.0+72.6	2005
45	日本杉谷川桥	6 跨连续刚构	桥长 453.0 m	2005
46	日本千代川桥	2 跨连续梁	桥长 233.5 m	2005
47	日本芦川第二桥	5 跨连续梁	桥长 356.4 m	—

注:“—”表示相关资料暂缺。

波形钢腹板的英文为“corrugated steel web”<sup>[12]</sup>,日本则称之为“波形钢板ウェブ”<sup>[6]</sup>,国内也有称为“折叠形钢腹板”<sup>[2]</sup>、“波纹钢腹板”<sup>[3]</sup>或“波折腹板”<sup>[13]</sup>,不过“波形钢腹板”一词用得最多、词意也最清晰。此外,波形钢腹板还可以用于钢箱梁桥中,而本文不讨论波形钢腹板在钢箱梁中的应用,仅限于在PC 箱梁中的应用。因此,为明确和简洁起见,本文以下称之为“波形钢腹板PC 组合箱梁桥”,简称

“波形钢腹板 PC 箱梁桥”。

2 构造要点

2.1 波形钢腹板箱梁的结构构造

波形钢腹板 PC 箱梁实际上可以看成由混凝土顶底板与两块作为腹板的波形钢板通过连接件结合起来,再配以预应力系统的组合箱梁结构。具体的结构构造详见图 3。混凝土腹板改为钢腹板后,腹板内

无法再布置预应力索,因此体内弯起索全部改用体外索。由于结构受力和施工上的需要,在顶底板内配置了少量的直索,不过也有不配体内索的实例,如前谷桥采用的就是全体外预应力体系<sup>[14]</sup>。

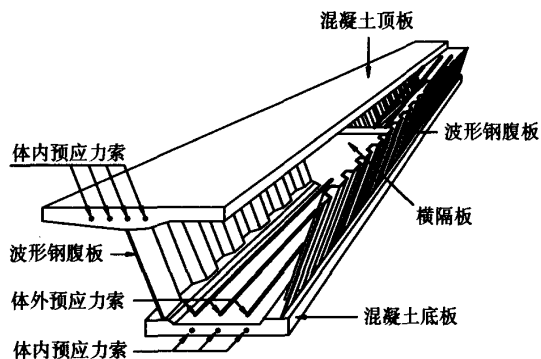


图3 波形钢腹板PC箱梁结构示意图<sup>[11]</sup>

## 2.2 波形钢腹板的形状

波形钢板主要由直板段、斜板段以及圆弧段组成,具体构造如图4所示。图中: $q$ 为一个波段的波长, $h_r$ 为波高, $b$ 、 $s$ 分别为直板段与斜板段的长度, $d$ 、 $t$ 分别为斜板段在桥梁纵向的尺寸和板厚, $r$ 为波形钢板内侧弯曲半径。

波形钢腹板形状的设计除了要满足力学方面的要求,即要通过腹板剪应力和腹板剪切压屈稳定验算<sup>[16]</sup>,还需兼顾制作、施工、美观以及经济等方面的

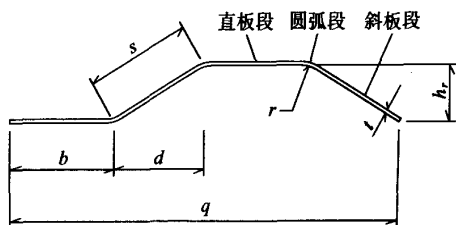


图4 波形钢板构造

因素<sup>[19]</sup>。由于波形钢腹板一般是通过冷弯加工制作,因而原则上要保证内侧弯曲半径大于板厚的15倍,当不能达到要求时,应保证钢材具有一定的冲击韧性,并且要控制氮元素的含量。波形钢腹板的板厚通常要满足钢板最小厚度的要求,一般使用的最小厚度为8 mm,而最大厚度则要根据计算确定<sup>[11]</sup>。

## 2.3 波形钢腹板箱梁的接合部<sup>[11]</sup>

波形钢腹板PC箱梁桥的接合部主要有以下4处:波形钢腹板之间的接合部、波形钢腹板与混凝土顶底板之间的接合部、波形钢腹板与横隔梁板之间的接合部以及波形钢腹板与内衬混凝土之间的接合部。

由于受到工厂预制、运输以及施工等方面的制约,波形钢板在纵桥向上需要被切割成块,然后才运到现场进行拼装。目前采用的波形钢腹板之间的连接方式有焊接和高强螺栓连接两种,具体的形式详见表2。

表2 波形钢腹板之间的连接形式<sup>[11]</sup>

焊缝连接		高强螺栓连接		
坡口焊缝	贴角焊缝	单面摩擦连接	双面摩擦连接	翼缘板单面摩擦连接

波形钢腹板与混凝土顶底板的接合部是两者共同工作的基础,它主要用来抵抗两者接触面之间的纵向剪力,防止两者之间产生相对滑移,并且还起到抵抗它们之间的掀起作用<sup>[15]</sup>。除此之外,接合部(链接键)还承担着横向面外弯矩,从而使得波形钢腹板与混凝土板构成一体,共同承受荷载<sup>[14]</sup>。由于它直接关系到整座桥梁的承载能力,所以该接合部是此类桥梁设计的关键环节,需谨慎对待。国外实桥采用的连接方式主要有4种,如图5所示。目前使用最多是用型钢连接件型的连接方式,日本道路公团所修建的大部分波形钢腹板PC箱梁桥都采用该连接件。

值得一提的是嵌入型连接件,它充分利用了埋入混凝土板中的波形钢腹板斜板段抗剪的效能,从而减少了抗剪部件的使用,也使得焊接总量大幅度地减少,从而使施工更为方便,大大地缩短了工期<sup>[19]</sup>。

波形钢腹板与横隔梁板之间的连接也是较为重要的接合部位,因为它要确保波形钢腹板所受到的剪力能有效地传递给下部结构。两者之间的连接方式与波形钢腹板跟混凝土翼缘板的连接形式基本一样,只不过该接合部是用来传递竖向剪力,因而其连接件是与波形钢腹板竖向边相接合的。图6只给出了栓钉连接件型与型钢连接件型的接合部形式。

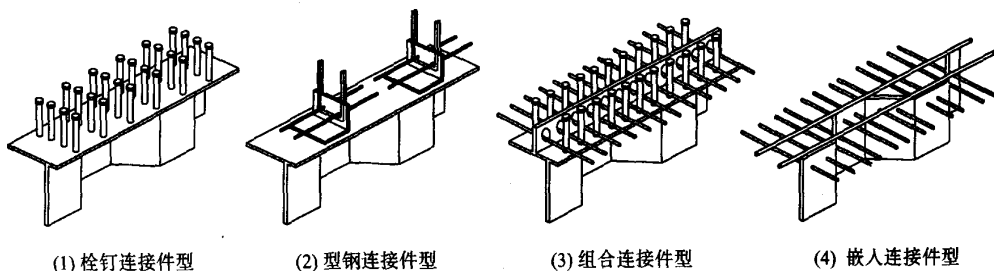
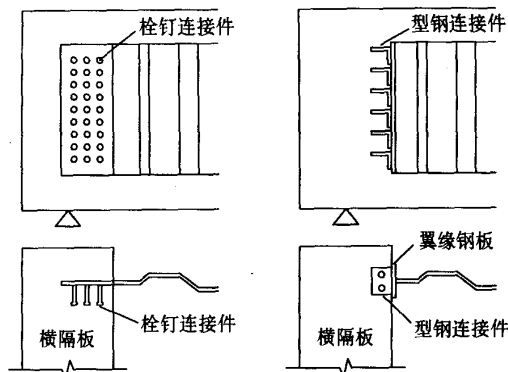
图 5 波形钢腹板与混凝土之间的接合部形式<sup>[11]</sup>

图 6 波形钢板与横隔板之间的接合部形式

当箱梁在支座处的高度较高或者为了平衡主边跨结构自重的时候,有时在波形钢腹板内侧浇注混凝土形成组合板结构。混凝土有助于提高波形钢腹板的抗屈曲能力,而且可以有效地把腹板承受的剪力传递给下部结构。以前谷桥为例,波形钢腹板与内衬混凝土之间是用栓钉连接件进行接合的,由于钢板和混凝土之间剪力配额的变化对栓钉的工作应力的影响并不大,因此栓钉之间的间距只需小于规范中为防止栓钉脱落所规定的最大值,即纵桥向为 600 mm,箱梁高度方向为 400 mm<sup>[14]</sup>。

### 3 结构特点

#### 3.1 与预应力混凝土箱梁桥相比的优点

(1) 自重降低,抗震性能好。腹板采用较轻的波形钢板,其桥梁自重与一般的预应力混凝土箱梁桥相比大为减轻,地震激励作用效果显著降低,抗震性能获得一定的提高。

(2) 节约建筑材料,改善经济指标。采用波形钢腹板代替厚重的混凝土腹板,大幅度减轻了上部结构的自重,增大了桥梁的跨径并使下部结构的工程量获得减少,从而降低了工程总造价。

(3) 改善结构性能,提高预应力效率。波形钢腹

板的纵向刚度较小,几乎不抵抗轴向力,因而在导入预应力时不受抵抗,纵向预应力束可以集中加载于上、下翼缘板,从而有效地提高预应力效率。

(4) 各种材料各尽所能,充分发挥其效率。在波形钢腹板 PC 箱梁桥中,混凝土用来抗弯,而波形钢腹板用来抗剪,几乎所有的弯矩与剪力分别由上、下混凝土翼缘板和波形钢腹板承担,而且其腹板内的应力分布近似为均布图形,而非传统意义上的三角形,有利于材料发挥作用<sup>[17]</sup>。

(5) 增加了截面回转半径,提高了结构效率。波形钢腹板 PC 箱梁桥中的混凝土均集中在上下翼缘处,回转半径几乎增加到最大值,大大地提高了截面的结构效率<sup>[2]</sup>。

(6) 减少现场作业,加快施工进度。波形钢腹板 PC 箱梁桥在施工过程中,可以减少大量的模板、支架和混凝土浇注工程,免除在混凝土腹板内预埋管道的烦杂工艺,而且波形钢腹板可以工厂化生产,现场拼装施工,从而加快了施工进度。

(7) 减少了节段数量,缩短了工期。由于梁体自重的减轻,悬臂施工时,可减少节段数量,如在采用混凝土腹板箱梁时,本谷桥需要 39 个节段,而采用波形钢腹板后,只需要 31 个节段,节段数减少了 20%,因而可以大大地加快施工速度,缩短工期<sup>[19]</sup>。

(8) 体外力筋可以替换,便于桥梁的维修和补强。波形钢腹板 PC 箱梁桥采用体外预应力,因而即使在长期运营后,体外预应力索出现磨损或断裂时,也可以在夜间停止车辆通行后对其进行更换。

(9) 避免了腹板开裂问题,耐久性能好。传统的预应力混凝土箱梁桥受外力荷载以及混凝土收缩、徐变的影响,常常在腹板出现裂缝,造成了混凝土截面削弱、钢筋腐蚀乃至要进行维修补强等一系列问题,而波形钢腹板 PC 箱梁桥则不会出现上述问题,耐久性能较好。

(10) 造型美观。波形钢腹板具有优良的外观,

可使桥梁获得较强的美感,是山区、风景区较好的桥型选择。

### 3.2 与平钢腹板 PC 箱梁桥相比的优点

(1) 抗剪承载力大大提高。与传统的平钢腹板相比,波形钢腹板具有更高的抗剪屈服强度,同时其强度还可以通过增大波形钢腹板的波高来提高,研究表明,波形钢腹板的抗剪承载力大概是加劲的平钢腹板的 2 倍<sup>[20]</sup>。

(2) 无需纵向加劲肋,减小了腹板厚度。波形钢腹板不承担弯矩,因而它不存在由弯曲正应力引起的腹板失稳问题,故无需配置纵向加劲肋,而且其抗剪屈服强度也较大,所以设计中只需较小的钢板厚度就可以满足要求了。

(3) 减少了横隔板的数量。因为波形钢腹板的横向绕曲刚度比平钢腹板要来得大,横向荷载(如风压引起的)可以直接传送给顶底板,因而可以减少横隔板的设置<sup>[5]</sup>。

(4) 避免吸收纵向预应力,提高预应力效率。平钢腹板在纵桥向上具有一定的刚度,因而不可避免会吸收一部分纵向预应力,降低纵向预应力的效应。研究表明,在截面尺寸和张拉应力相同的条件下,加劲的平钢腹板吸收的纵向预应力可达 20%~25%,而波形钢腹板则没有上述缺陷<sup>[2]</sup>。

(5) 对混凝土收缩、徐变和温度变化的影响小。对于平钢腹板 PC 组合梁桥来说,由于上下翼缘板混凝土的塑变特性,随着时间的推移,本身的收缩徐变增大,翼缘处的预应力有进一步向腹板转移的趋势,这将大大影响其长期的使用性能。而波形钢腹板由于自身的纵向刚度较小,并不会对混凝土的收缩徐变或者温度变化引起的变形有约束作用,可以很好地避免上述缺点<sup>[17]</sup>。

(6) 对由几何缺陷所引起的过早屈曲的敏感度有很大的降低。由于在波形钢腹板平面上的缺陷一般仅为折叠幅度(尺寸)的 1/10~1/20,而且焊接产生的局部缺陷均集中在腹板的边缘处,被固定到混凝土板中,所以缺陷对结构的受力影响很小<sup>[2]</sup>。

(7) 具有良好的三维柔韧性,便于腹板装配施工。明显的三维柔韧性能使波形钢腹板的拼装条件获得了很大的改进,即波形钢腹板在安装至最后位置之前,可以人为地进行变形(轴向和横向弯曲,甚至可以扭转),便于了腹板的装配<sup>[2,20]</sup>。

### 3.3 波形钢腹板 PC 箱梁桥的不足之处

(1) 波形钢腹板较高的制作成本是其主要缺

点,但随着制作工艺的提高,这一问题也正逐步地得到解决。

(2) 相对于普通的混凝土箱梁来说,波形钢腹板箱梁断面的抗扭刚度和抗畸变刚度有所降低<sup>[18]</sup>。

(3) 波形钢腹板的屈曲破坏较为突然,且在屈曲后阶段,其承载能力大约下降到相当于平钢腹板的水平<sup>[16]</sup>。

(4) 当波形钢腹板之间采用焊接连接时,其竖向边缘焊接数量比平钢腹板稍有增多。

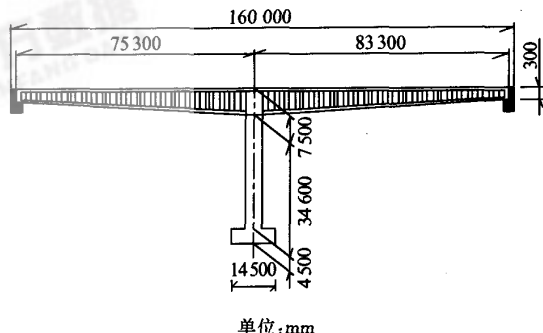
(5) 波形钢腹板有较多的拐角,容易滞留泥沙等杂质,比平钢腹板易受腐蚀。

虽然波形钢腹板 PC 箱梁桥有如上不足,但无论与传统的预应力混凝土箱梁桥相比还是与加劲的平钢腹板 PC 箱梁桥相比,它在结构性能、减少工程量、缩短工期以及降低成本等方面具有很大的优势,而且在施工性能和美观方面 also 具有很大的吸引力,是一种值得推广的新桥型。

## 4 最新发展趋势

### 4.1 全体外索波形钢腹板 PC 箱梁桥——日本前谷桥<sup>[14]</sup>

该桥位于日本某高速公路上,为波形钢腹板 PC 箱梁的 T 形刚构桥,其上、下行车线分离,上、下行线桥长分别为 163.000 m 和 160.000 m,跨径布置分别为 77.300 m+84.300 m 与 75.300 m+83.300 m。单幅桥面宽为 10.840 m,净宽 9.25 m。图 7、图 8 分别为该桥的总体布置和建成后的照片。



单位: mm

图 7 前谷桥总体布置

该桥结构上最显著的特点是全部采用预应力体外索,顶底板内没有布置纵向预应力索。它具有以下几个优点:预应力索安装简便;易于检查预应力索,有利于索的养护;预应力索的替换或者再次张拉成为可能;大大地缩短了施工工期,特别是使用预制分段拼装方法施工的桥梁。

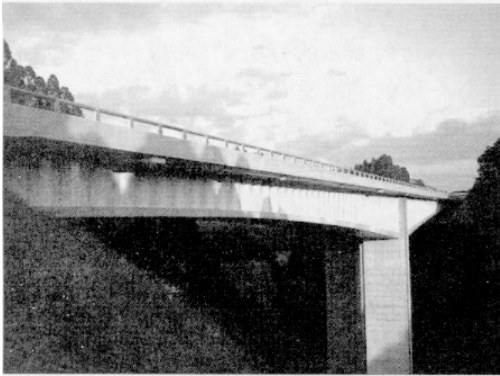


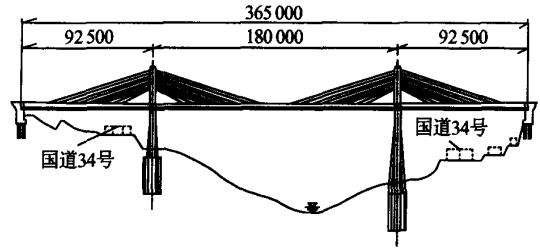
图 8 前谷桥竣工照片<sup>[14]</sup>

在悬臂施工过程中,通过使用临时预应力杆件来抵抗施工阶段的荷载,并在每 2~3 块施工段现浇结束后,张拉预应力体外索以代替临时预应力杆件,然后将临时预应力杆件抽出投入下一步施工中使用,从而提高了施工材料的利用率。

4.2 波形钢腹板 PC 箱梁部分斜拉桥——日本日见桥<sup>[21,22]</sup>

部分斜拉桥与波形钢腹板 PC 箱梁一样是由法国人首先提出的,但却都在日本得到大量发展的新型桥梁结构。新建的日本日见桥将波形钢腹板 PC 箱梁作为部分斜拉桥的主梁,使这两种新颖的桥梁结构形式有机地结合起来,即所谓的波形钢腹板部分斜拉桥。

日见桥是第一座建成的波形钢腹板部分斜拉桥,该桥距长崎市约 4 km,跨越一个山谷和分布在山谷两侧的国道 34 号线。大桥全长 365 m,主桥采用部分斜拉桥,跨径布置为 91.8 m+180 m+91.8 m,桥面净宽 9.75 m,总宽 12.95 m。大桥的总体布置见图 9。由于该桥桥面不是很宽,所以为便于施工,主梁采用单箱单室断面的梯形梁,梁高为 4.0 m。该桥的波形钢腹板采用 SM490YB 型钢,波形钢腹板与混凝土翼缘板的接合部采用型钢连接件进行连接。

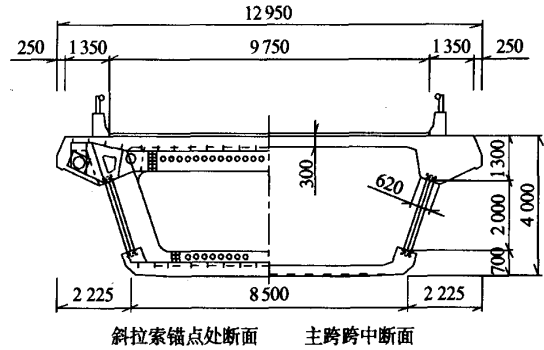


单位: mm

图 9 日见桥总体布置

将波形钢腹板 PC 箱梁用于部分斜拉桥的主梁中,有利于降低主梁的自重、增大跨径、减小地震反应;也有利于施工的合理化和工期的缩短,从而降低施工成本;波形钢腹板具有良好的折叠性,使施加在主梁上的预应力更有效地作用在箱梁的顶底板,而且这种折叠性使得腹板抗局部屈曲的能力有了很大的提高。

以往的预应力混凝土斜拉桥和部分斜拉桥主梁在斜拉索的锚固区常用混凝土横隔板来加强,而日见桥采用的是钢横隔板,它主要用于承担斜拉索的竖向分力、增强箱梁的抗扭刚度,并对体外索起定位作用,而且采用钢横隔板也有利于减轻自重、满足局部受力要求并起到提高施工效率的作用。日见桥的主梁横断面见图 10,图 11 为主跨悬臂段即将合拢的施工照片。



单位: mm

图 10 日见桥主梁横断面

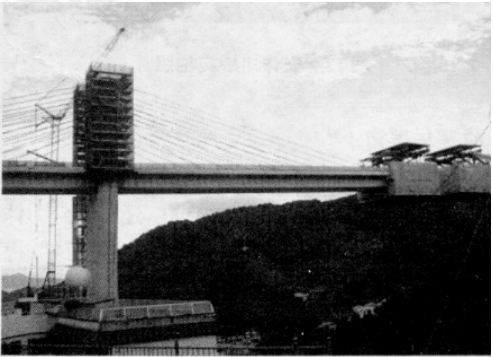


图 11 日见桥实拍照片

4.3 波形钢腹板 PC 箱梁斜拉桥——日本矢作川桥<sup>[23]</sup>

波形钢腹板 PC 箱梁的应用从早期的简支梁、连续梁发展到连续刚构,近几年在日本又发展到部分

斜拉桥甚至斜拉桥,波形钢腹板PC箱梁的应用范围在不断地扩大,也使其跨径不断地刷新。

第一座采用波形钢腹板PC箱梁作为斜拉桥主梁的是日本的矢作川桥。该桥位于日本第二东名高速公路上,为双独塔扇形单索面斜拉桥,在两主塔之间设立了一个桥墩,使其从传统的双塔三墩的斜拉桥结构形式变化成双塔4跨的结构形式。大桥全长

820 m,跨径布置为  $174.7\text{ m} + 2 \times 235.0\text{ m} + 174.7\text{ m}$ ,图12所示的为其总体布置。该桥采用上下行车线一体的单幅桥面,桥面宽度43.8 m,主梁为单箱5室箱梁,梁高为4~6 m,主塔横桥布置采用倒Y形,塔高为109.6 m。图13为塔柱与主梁连接处的实拍照片。

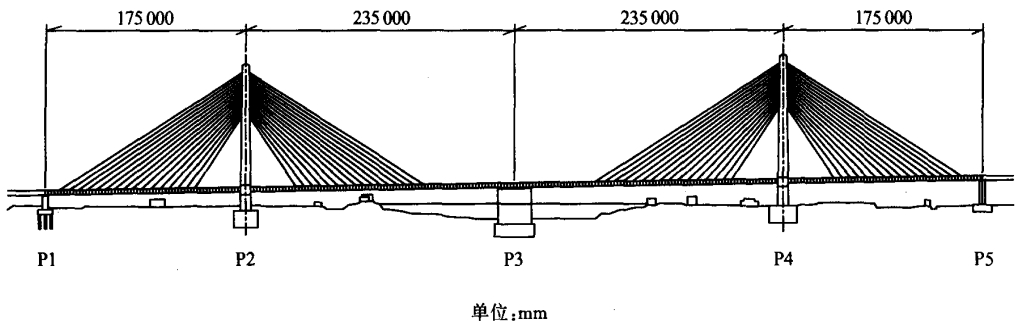


图12 矢作川桥总体布置

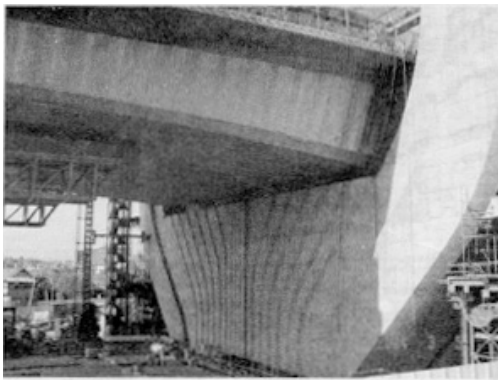


图13 矢作川桥实拍照片

## 5 前景与展望<sup>[4,24,25]</sup>

从法国、日本等国家已建成的数十座波形钢腹板PC箱梁桥来看,无论是结构形式,还是预应力体系都有其独到之处,而且在减少工程量、缩短工期、提高经济效益以及施工性能和美观等方面具有很大的优势;另外它的跨度空间很大,从几十米到几百米的跨径都能胜任;其适用的桥梁结构形式也很广泛,从简支梁、连续梁到连续刚构,再到部分斜拉桥甚至斜拉桥,具有强大的适应能力,是一种很值得推广的新型桥梁。

波形钢腹板PC箱梁的研究在我国已经开展了,但由于缺乏比较系统、完善、科学的设计理论和方法,因而其工程实例还是空白。随着我国西部大开发

战略决策的实施,高等级公路已由城市向山区发展,而西部大部分是重丘区和山区,为了适应“轻质、高强、长效”的要求,必须探索出一种技术上可行,经济效益高,施工方便且美观并与西部的生态环境相协调的桥梁结构,而波形钢腹板PC箱梁桥便是一种较好的选择。

目前我国修建该类型桥梁可能在造价上会高于普通的预应力混凝土箱梁桥,但它没有混凝土腹板的开裂问题,而且施工上也会比较方便,这也许可以成为我国修建波形钢腹板PC箱梁桥的一个主要考虑因素。不过,随着我国钢产量的不断增加、波形钢腹板制作工艺的成熟、国内对该类型桥梁结构的分析研究的进一步深入以及对国外工程实践经验的借鉴,相信在不久的将来,波形钢腹板PC箱梁桥会在我国的桥梁建设中获得广泛的应用发展。

## 参考文献:

- [1] 王福敏. 钢腹板预应力混凝土组合箱梁桥的发展及其应用现状[J]. 公路交通技术, 1999, (2).
- [2] 周一桥, 钱建漳, 编译. 折叠形钢腹板预应力混凝土箱梁[J]. 国外桥梁, 2000, (2).
- [3] 蔡千典, 冉一元. 波形钢腹板预应力结合箱梁结构特点的探讨[J]. 桥梁建设, 1994, (1).
- [4] 朱万勇. 波形钢腹板PC组合箱梁设计理论与方法研究[D]. 长安大学硕士学位论文, 2003.
- [5] 刘磊, 钱冬生, 编译. 波纹钢腹板预应力结合梁桥[J].

- 国外公路,1999,19(1).
- [6] 李昇录,赵忠永,朴东圭. 韩国初的波形钢板ウェブ PC 箱桁桥——イルスン大桥设计概要——. プレストレストコンクリート, 2003,45(3).
- [7] 刘海燕,摘编. 日本修建的波形钢腹板 PC 箱梁桥一览表[J]. 国外桥梁,2002,(1).
- [8] 孟庆伶,日本在建的波形钢板腹板 PC 箱形梁桥[J]. 铁道建筑,2001,(5).
- [9] 水口和之,芦塚憲一郎. JH における 波形钢板ウェブ PC 箱桁桥,桥梁と基础,2002,(8).
- [10] 村尾光弘,田中克典,宫内秀敏,等. 信乐七号桥、津久见川桥的设计と施工. 桥梁と基础,2004,(2).
- [11] 森拓也. 新しい PC 桥的设计[M].
- [12] E Y Sayed-Ahmed. Girders with Corrugated Steel Webs: Buckling Modes and Numerical Modelling. Advances in Structures. Proceedings of Advances in Structures—Steel, Concrete, Composite and Aluminium, Sydney, Australia, June22—25, 2003.
- [13] 李时,郭彦林. 波折腹板梁抗剪性能研究[J]. 建筑结构学报,2001,(6).
- [14] 黄卿维,陈宝春. 日本前谷桥的设计与施工[J]. 福建建筑,2005,(1).
- [15] 叶见曙. 结构设计原理[M]. 北京:人民交通出版社,1997.
- [16] 唐继舜,尹德兰,刘磊. 波纹钢腹板桥梁的特色及其应用探讨[R]. 四川省公路学会桥梁专委会 98 年桥梁学术讨论会,1998.
- [17] 宋建永,王彤,张树仁. 波纹钢腹板体外预应力混凝土组合梁桥[J]. 东北公路,2002,25(1).
- [18] 李宏江,叶见曙,万水,等. 波形腹板箱梁的扭转与畸变分析及试验研究[J]. 桥梁建设,2003,(6).
- [19] 刘岚,崔铁万,编译. 本谷桥的设计与施工——采用悬臂假设施工法的波纹形钢腹板预应力混凝土箱梁桥[J]. 国外桥梁,1999,(3).
- [20] 刘磊,钱冬生. 波纹钢腹板的受力行为[J]. 铁道学报,2000,(增刊).
- [21] 陈宝春,黄玲,吴庆雄. 波形钢腹板部分斜拉桥[J]. 世界桥梁,2004,(4).
- [22] 佐川信之,酒井松男,冈泽祐三,等. 日见桥的设计と施工. 桥梁と基础,2003,(6).
- [23] 角昌隆,水口和之. 日本道路公团における最近の複合构造事例. 第 5 回複合构造の活用に関するシンポジウム讲演论文集,2003.
- [24] 王福敏,张长青,周长晓. 波形钢腹板箱梁研究成果综述[J]. 公路交通技术,2001,(1).
- [25] 陆海峰,万水. 波形钢腹板预应力混凝土组合箱梁的结构设计[J]. 华东公路,2003,(3).

## A Summary of Application of Prestressed Concrete Box-Girder Bridges with Corrugated Steel Webs

CHEN Bao-chun, HUANG Qing-wei

(College of Civil Engineering and Architecture, Fuzhou University, Fuzhou 350002, China)

**Abstract:** The application and development of prestressed concrete box-girder bridges with corrugated steel webs are introduced. The table of such bridges is provided. The key points of structures and behaviors of this new type bridges are discussed. According to some typical bridges cases, the latest development trend of prestressed concrete box-girder bridges with corrugated steel webs is introduced. Finally, the development prospect of such bridges is forecasted.

**Key words:** corrugated steel webs; box-girder bridge; application