

波形钢腹板 预应力混凝土桥 设计与施工

陈宜言 主编

王用中 主审



人民交通出版社
China Communications Press

波形钢腹板 预应力混凝土桥 设计与施工

陈宜言 主编

王用中 主审



人民交通出版社

China Communications Press

内 容 提 要

本书共十章,介绍了波形钢腹板预应力混凝土桥的适用范围、概念设计、使用材料、设计基本原则、整体结构分析、部件设计、抗震设计、施工、质量管理及日本波形钢腹板预应力混凝土桥实例等。

本书可供公路桥梁设计、施工人员参考,也可作为大中专院校师生参考书。

图书在版编目(CIP)数据

波形钢腹板预应力混凝土桥设计与施工/陈宜言主编.

北京:人民交通出版社,2009.9

ISBN 978-7-114-07887-3

I.波… II.陈… III.①钢板:腹板-预应力混凝土桥-结构设计②钢板:腹板-预应力混凝土桥-工程施工

IV.U448.35

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 116204 号

书 名:波形钢腹板预应力混凝土桥设计与施工

著 译 者:陈宜言

责任编辑:赵瑞琴

出版发行:人民交通出版社

地 址:(100011)北京市朝阳区安定门外外馆斜街3号

网 址:<http://www.ccpres.com.cn>

销售电话:(010)59757969,59757973

总 经 销:北京中交盛世书刊有限公司

经 销:各地新华书店

印 刷:北京牛山世兴印刷厂

开 本:880×1230 1/16

印 张:9.5

字 数:292千

版 次:2009年9月 第1版

印 次:2009年9月 第1次印刷

书 号:ISBN 978-7-114-07887-3

印 数:0001—2000册

定 价:26.00元

(如有印刷、装订质量问题的图书由本社负责调换)

前 言

波形钢腹板预应力混凝土桥(简称“波形钢腹板 PC 桥”)源于法国,近年来在日本得到了深入的研究与广泛的应用,成为日本高速公路的推荐桥型。波形钢腹板预应力混凝土桥属于钢-混凝土组合结构中的一种,在这一结构中用波形钢腹板取代了通常的预应力混凝土箱梁的混凝土腹板,从而使箱梁自重减轻、恒载内力减少,成为波形钢腹板预应力混凝土桥结构的一大特点;由于波形钢腹板的褶皱效应,导致弯曲时混凝土顶、底板承受弯矩、波形钢腹板承受剪力。因顶、底板预应力布束空间有限而用体外索,则为波形钢腹板预应力混凝土桥结构的另一特点。

由这些特点衍生出的波形钢腹板预应力混凝土桥抗震性能好、施工简便、经济性较好等一系列优点,促使其在桥梁工程中广泛应用。其最佳应用跨径为 80 ~ 200m。这一跨径范围在我国多采用预应力混凝土箱形连续梁(刚构)。多年的工程建设实践表明,预应力混凝土箱形连续梁桥存在两类工程病害:梁根部混凝土腹板开裂;跨中部持续下挠。究其原因在于梁自重内力占设计内力比重过大,混凝土腹板抗剪、抗拉强度不足。而波形钢腹板预应力混凝土箱梁则有针对性地改善了预应力混凝土箱梁的这两项弊病,若能推广应用,则可望从根本上避免了我国大跨度预应力混凝土箱梁桥上述两项工程病害。

为此,我们在有关部门支持下,于 2007 ~ 2008 年将此技术先后应用于山东鄄城黄河桥(70m + 11 × 120m + 70m 连续梁桥)和深圳南坪快速路二期工程南山大桥(80m + 130m + 80m 连续梁桥)工程中。为在我国推广应用波形钢腹板预应力混凝土桥做点开拓性工作,结合这两座桥设计并参考日本相关资料,编写了这本《波形钢腹板预应力混凝土桥设计与施工》。书末附有日本已建数十座波形钢腹板 PC 桥的基本资料,以供参考。全书由陈宜言主编、王用中主审。其他参加此书编写工作的人员基本为上述两座桥梁设计组的工程师,具体分工为:第一章 王用中、陈宜言,第二章 陈宜言、王用中,第三章 封洁纯、李广慧,第四章 王健、姜瑞娟,第五章 姜瑞娟、王健,第六章 王纯、孟磊,第七章 周建春、彭栋木,第八章 周建春、张建勋,第九章 吴红军、孟磊,第十章 李广慧、张建勋;附录 王用中、孟磊。

在鄄城桥、南山桥两座桥设计以及在本书的编写过程中,我们曾得到日本长大公司和国内从事波形钢腹板预应力混凝土桥研究的专家、学者的许多帮助,在此一并表示感谢!

陈宜言 王用中

2009 年 6 月

目 录

第一章 总则	1
1.1 适用范围	1
1.2 术语定义	2
1.3 相关规范	4
1.4 结构要点	5
1.5 构造特征	7
1.6 桥型	8
1.7 曲线梁	8
1.8 施工方案	8
1.9 维护管理	9
第二章 概念设计	10
2.1 概念设计	10
2.2 断面形状	10
2.3 梁高	11
2.4 箱梁断面设计	12
2.5 墩上块构造	13
2.6 横梁、横隔	13
2.7 悬臂施工节段的划分	14
第三章 使用材料	15
3.1 基本要求	15
3.2 混凝土	15
3.3 钢筋	16
3.4 体内索	17
3.5 体外索	18
3.6 波形钢板	20
第四章 设计基本原则	24
4.1 基本概念	24
4.2 荷载	24
4.3 验算准则	25
第五章 整体结构分析	27
5.1 整体结构受力基本假定	27
5.2 设计荷载作用时的整体分析	27
5.3 极限荷载作用时的整体分析	32
5.4 横向分析	34
第六章 部件设计	36
6.1 波形钢腹板设计、计算	36
6.2 墩顶部分设计	44

6.3	桥面板设计	45
6.4	横梁、横隔设计	46
6.5	波形钢腹板与桥面板连接	47
6.6	体外索的锚固部以及转向部	60
6.7	体外索	64
第七章	抗震设计	67
7.1	抗震设计原则	67
7.2	用于抗震设计的地震动	67
7.3	抗震分析原则	67
7.4	分析模型及分析方法	68
7.5	波形钢腹板 PC 箱梁桥梁抗震分析	69
第八章	抗风设计	70
8.1	抗风设计方法	70
8.2	波形钢腹板箱梁桥抗风概念设计	71
8.3	静态抗风设计	71
8.4	动态抗风设计的必要性的判定	71
8.5	动态抗风设计	72
8.6	其他	73
第九章	施工	74
9.1	总则	74
9.2	波形钢腹板制作	74
9.3	波形钢腹板运输	83
9.4	波形钢腹板安装	83
9.5	波形钢腹板 PC 箱梁桥施工工艺	86
9.6	体外索施工	90
9.7	监理监控	91
9.8	其他	96
第十章	质量检验评定标准	97
10.1	总则	97
10.2	规范与标准	97
10.3	波形钢腹板制作质量检验	97
10.4	波形钢腹板涂装质量检验	98
10.5	波形钢腹板安装质量检验	99
10.6	波形钢腹板 PC 箱梁焊接工程质量检验	100
10.7	波形钢腹板 PC 桥顶、底板钢筋混凝土工程质量验收标准	102
10.8	钢筋加工及安装质量检验	102
10.9	预应力筋加工和张拉质量检验	103
10.10	波形钢腹板 PC 桥预制梁及安装质量检验	104
10.11	波形钢腹板 PC 桥悬臂施工质量检验	104
10.12	波形钢腹板 PC 桥支架现浇梁施工质量检验	105
10.13	波形钢腹板 PC 桥顶推施工质量检验	106
附 录	日本波形钢腹板预应力混凝土桥实例简介	107
参考文献		145

第一章 总 则

1.1 适用范围

本书适用于波形钢腹板的 PC 箱梁桥设计与施工。

【说明】

波形钢腹板预应力混凝土箱梁桥就是用波形钢板取代预应力混凝土箱梁混凝土腹板做成的箱梁桥,简称为波形钢腹板 PC 箱梁桥,其构造示意图如图 1.1.1。其显著特点是用厚度 10 ~ 20mm 左右的钢板取代了厚度 30 ~ 80cm 的混凝土腹板;鉴于顶底板预应力束放置空间有限,而应用体外索来代替部分或全部体内索,则是波形钢腹板 PC 箱梁桥的第二个特点。

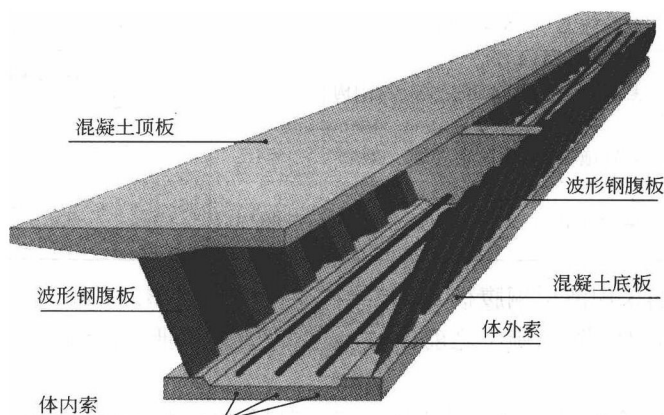


图 1.1.1 波形钢腹板 PC 箱梁

波形钢腹板 PC 箱梁是钢与混凝土组合结构的一种。这一结构除了因用波形钢腹板取代了混凝土腹板而能够减轻自重以外,还因波形钢板的手风琴效果,而提高预应力的效率;另外因为能够省去混凝土腹板的钢筋、PC 钢材的配置、混凝土灌注等施工程序,因而简化了施工步骤。

波形钢腹板 PC 箱梁桥源于法国,近年来在日本得到了广泛的应用,目前日本已建成的波形钢腹板 PC 箱梁桥总数已超过 130 座,其代表性桥梁建设业绩如表 1.1.1 所示。由表中可知波形钢腹板 PC 箱梁桥在日本发展趋势。本书附录列出了数十座日本已建波形钢腹板 PC 桥基本资料,以供参考。

我国对波形钢腹板箱梁桥的研究还处于初级阶段,先后有交通部交通科研院、西南交通大学、东南大学、重庆交通大学等单位,对该组合箱梁的钢腹板屈曲强度、方案设计、桥面板有效宽度、剪力连接键等做过研究。

到目前为止,国内只修建了 6 座波形钢腹板 PC 箱梁桥,分别是青海三道河桥(50m 跨单箱双室箱梁),江苏淮安的长征桥(18.5m + 30.5m + 18.5m 的 3 跨连续梁,人行桥),河南信阳的浉河大桥(4 跨 30m 先简支后连续梁小箱梁,公路桥),重庆市永川的大堰河桥(25m 简支箱梁,公路桥)及山东东营的两座人行桥。正在施工的山东鄄城黄河公路大桥(70m + 11 × 120m + 70m 连续梁)及已完成施工图设计的深圳市南坪快速路二期工程的南山大桥(80m + 130m + 80m 连续梁)。我国波形钢腹板 PC 桥的建设正进入一个新的发展阶段,波形钢腹板 PC 箱梁桥建设高潮正在形成。

表 1.1.1 日本在建及已建的具有代表性的波形钢腹板箱梁桥

编号	桥梁名	施工方法	构造形式	桥长(m)	跨径布置(m)	竣工年份
1	矢作川桥(东)	悬臂施工	4 跨预应力斜拉桥	820.0	173.4 + 2 × 235.0 + 173.4	2005
2	日见梦大桥	悬臂施工	3 跨部分斜拉桥	365	91.8 + 180 + 91.8	2003
3	栗东桥	悬臂施工	4 跨部分斜拉桥	495.0	137.6 + 170.0 + 115.0 + 67.6	2008
4	朝比奈川桥	悬臂/满堂 支架	7 跨连续刚构	670.7	81.2 + 150.4 + 91.2 + 73.2 + 94.7 + 104.8 + 73.2	2008
5	上伊佐布第三高架桥	悬臂施工	5 跨预应力连续刚构	449.0	53.0 + 105.0 + 136.0 + 99.0 + 53.0	2007
6	谷津川桥	悬臂施工	5 跨预应力连续梁	383.5	43.8 + 91.0 + 135.0 + 74.0 + 37.3	2008
7	中一色川桥(上)	悬臂施工	5 跨预应力连续梁	535.4	71.3 + 3 × 130.0 + 71.3	2007
8	菱田川桥	悬臂施工	8 跨预应力连续刚构	688.0	64.9 + 3 × 105.0 + 124.0 + 75.0 + 54.0 + 52.9	2008
9	入野高架桥	支架施工	10 跨预应力连续梁	679.0	56.7 + 3 × 58.0 + 80.0 + 124.0 + 80.0 + 2 × 58.0 + 45.7	2007
10	前川桥	悬臂施工	5 跨预应力连续梁	500.0	76.8 + 120.0 + 104.0 + 120.0 + 76.8	2008
11	池山高架桥	悬臂施工	10 跨预应力连续刚构	941.0	46.5 + 104.0 + 114.0 + 99.0 + 4 × 106.5 + 98.0 + 50.5	2006
12	中一色川桥(下)	悬臂施工	6 跨预应力连续梁	574.3	62.8 + 3 × 112.0 + 110.5 + 61.3	2007
13	宫家岛高架桥	悬臂施工	23 跨预应力连续梁	1432.0	51.2 + 7 × 53.0 + 54.0 + 85.0 + 53.0 + 3 × 52.0 + 58.5 + 60.0 + 101.5	2007

除常规梁式桥外,当采用波形钢腹板 PC 箱梁桥梁的其他桥型时,为了把握波形钢腹板 PC 箱梁桥其他特性,在进行结构分析、设计、施工之前,要做必要的试验和研究,在研究过程中确立有关设计模式及相关的施工工艺。

鉴于波形钢腹板 PC 箱梁桥与工程习用的预应力混凝土箱梁桥在设计、受力、施工各方面均有类同之处,本书仅就其与常用的预应力混凝土箱梁桥设计、施工不同点及由此而导出的力学特性、结构构造的差别,吸收相关的研究成果、工程经验加以叙述,以对波形钢腹板 PC 箱梁桥的设计、施工要点做原则性的明确。

1.2 术语定义

本书中所使用的术语意义如下:

- (1)波形钢腹板 PC 箱梁桥:采用波形钢腹板的钢 - 混凝土组合 PC 箱梁桥。
- (2)波形钢板:被加工成波形形状的构造用钢板。
- (3)褶皱效应(手风琴效应):波形钢腹板似手风琴一样伸缩,无法抵抗轴向力以及弯矩的性质。
- (4)波长:波形钢板的峰和峰、谷和谷的距离(图 1.2.1)。
- (5)波高:波形钢板的波幅(图 1.2.1)。
- (6)局部屈曲:波形钢板在一个波幅内(折痕与折痕之间)的屈曲(图 1.2.2)。
- (7)整体屈曲:波形钢板整体的屈曲(图 1.2.2)。
- (8)组合屈曲:局部屈曲与整体屈曲复合形成的屈曲形式(图 1.2.2)。
- (9)连接部分:使混凝土与波形钢腹板成为一体的部分。

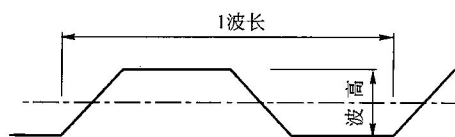


图 1.2.1 波形与波高

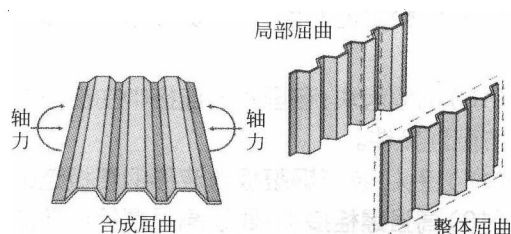


图 1.2.2 波形钢板的屈曲示意

(10) 栓钉连接: 通过被焊接在钢翼缘的栓钉使混凝土与波形钢腹板成为一体的连接方法 [图 1.2.3c)]。

(11) 埋入式连接: 把波形钢腹板直接埋入混凝土中使其与混凝土成为一体的连接方法 [图 1.2.3f)]。

(12) 单开孔钢板连接件连接 (S-PBL 键连接): 通过开孔钢板连接件使混凝土与波形钢腹板一体化的连接方法, 常与栓钉连接共同使用, 形成 S-PBL + 栓钉连接 [图 1.2.3b)、e)]。

(13) 双开孔钢板连接件连接 (Twin-PBL 键连接): 通过两块开孔钢板连接件使混凝土与波形钢腹板连成一体化的连接方法 [图 1.2.3a)]。

(14) 角钢剪力键连接: 通过焊接在钢翼缘板上的角钢剪力键 (L 形钢) 使混凝土与波形钢腹板成为一体的连接方法 [图 1.2.3d)]。

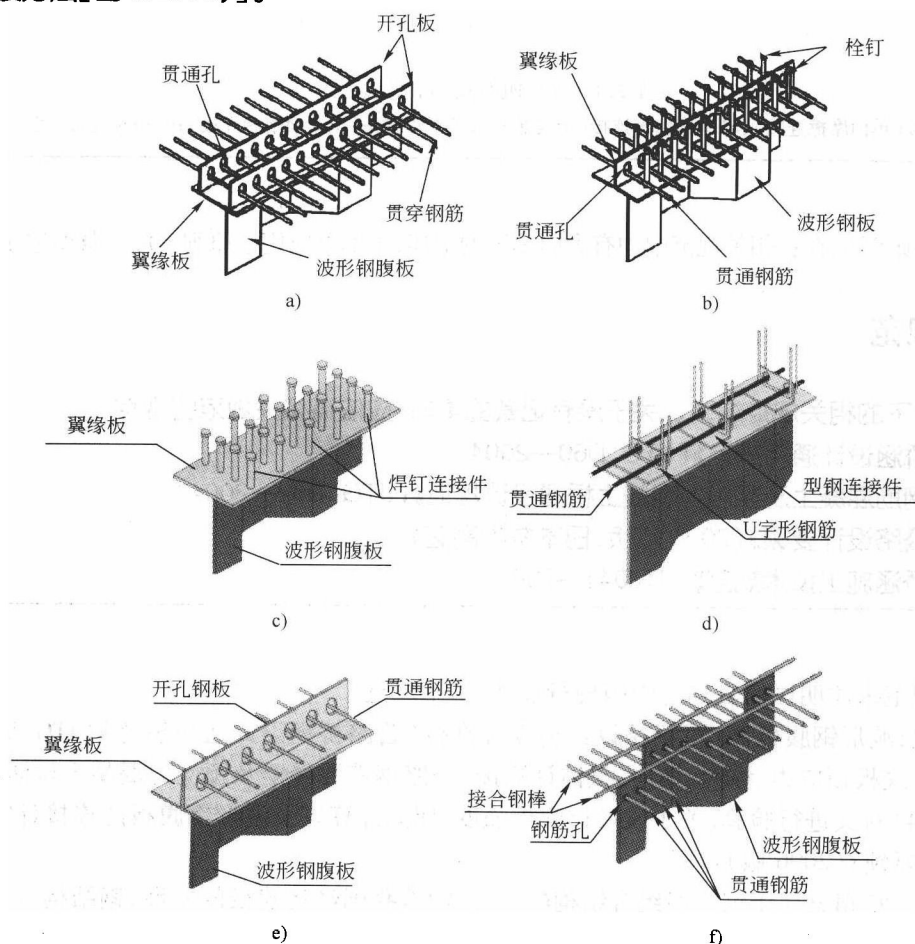


图 1.2.3 波形钢腹板与混凝土顶底板的连接方式

a) Twin-PBL 键连接; b) S-PBL + 栓钉连接; c) 栓钉连接; d) 角钢剪力键连接; e) S-PBL 键连接; f) 埋入式连接

(15)混凝土剪力销:把混凝土注入被穿孔的钢板,在孔中填充的混凝土作为抗剪连接件而产生作用。

(16)抗剪齿块:在埋入式连接中由被埋入的波形钢板的斜幅板与轴方向所焊接的钢筋所构成的混凝土抗剪连接件。

(17)接头:波形钢腹板与波形钢腹板连接的部分。

(18)高强螺栓接头:通过高强螺栓连接波形钢腹板[图 1.2.4a)、b)]。

(19)单面摩擦接头:带有一个摩擦面的高强螺栓接头[图 1.2.4a)、b)]。

(20)焊接接头:通过焊接连接波形钢腹板。

(21)对焊接头:使用了对焊(槽焊、坡口焊)的接头[图 1.2.4c)]。

(22)搭接贴角焊接头:使用了贴角焊的搭接接头[图 1.2.4d)]。

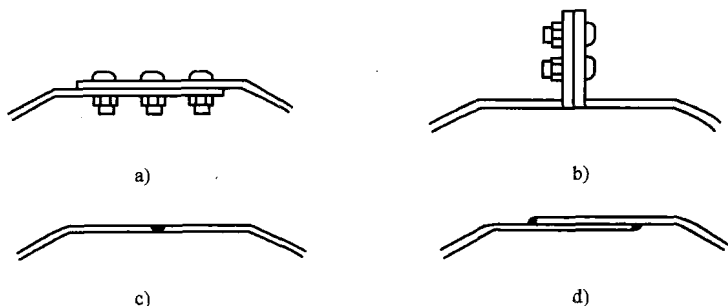


图 1.2.4 波形钢腹板之间的连接方式

a) 高强螺栓连接(单面摩擦连接); b) 单面摩擦连接(带翼缘板); c) 对焊接头(全断面熔融焊接); d) 搭接连接(连接角焊接)

【说明】

本款所述专项术语,在各相关规范中均有大同小异的记述,于本书应用中原则上以本款所述定义为准。

1.3 相关规范

本书遵照以下的相关规范编写。关于没有记载的事项,应依照相关规范的规定:

(1)《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60—2004)

(2)《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG D62—2004)

(3)《高速公路设计要领》(2006 年版,日本东中高速)

(4)《公路桥涵施工技术规范》(JTJ041—2000)

【说明】

本款所述规范未注明国家者均为中国现行设计、施工规范。

按本款规定,波形钢腹板 PC 箱梁桥设计荷载标准按《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60—2004)采用,箱梁的顶、底板预应力、纵向、横向、整体计算按《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG D62—2004)对其进行验算,关于波形钢腹板强度、屈曲计算以及波形钢腹板的连接计算则按日本《高速公路设计要领》(2006 版)进行。

波形钢腹板 PC 箱梁属于钢-混组合结构的一种,随着我国经济建设的发展,钢结构、混凝土结构、钢-混组合结构及预应力混凝土结构的设计、施工规范,亦在不断丰富、完善发展中,因此本书编写中还参考了以下规范的征求意见稿:

《公路钢结构桥梁设计规范》(JTG/TD64—2009)

《钢-混凝土组合结构桥梁设计与施工细则》(JTG/T D64—01)

《大跨径预应力混凝土梁桥设计施工技术指南》(征求意见稿)

《公路体外索预应力混凝土桥梁设计指南》(征求意见稿)

日本是世界上建设波形钢腹板 PC 箱梁桥最多的国家,随着建设规模的扩大、技术水平的提高、研究成果的增多,日本关于波形钢腹板 PC 箱梁桥的设计、施工技术规范也在不断完善与丰富,在本书的编写中,还参考了如下日本波形钢腹板 PC 箱梁桥的设计、施工规范(标准、指南、手册):

《高速公路设计要领》(2006 年版,日本东中高速)

《波形钢腹板 PC 箱梁桥设计、施工指南》(2005.4,日本高速公路技术中心)

《波形钢腹板 PC 箱梁桥设计计算手册》(1998.12,日本波形钢腹板组合结构研究协会)

《波形钢腹板桥问题与解答》(2002.6,日本波形钢腹板组合结构研究协会)

《组合结构桥设计、施工标准》(2005.11,日本预应力混凝土协会)

《波形钢腹板桥设计、施工手册》(2002.3,日本高速公路技术中心)

日本波形钢腹板 PC 箱梁桥的设计,除疲劳计算,按允许应力幅、应力按弹性状态计算外,其他则采用以概率理论为基础的极限状态设计方法,用分项系数设计表达式进行计算。其设计计算采用了按极限荷载与设计荷载分别验算的方式。其中:极限荷载验算实为承载力极限状态验算,设计荷载验算实为正常使用极限状态验算。

中国国家标准《钢结构设计规范》(GB 50017—2003)与《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60—2004)、《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG D62—2004),亦采用了概率理论为基础的极限状态计算方法,但设计表达式与日本上述规范(标准)不完全相同。《公路桥涵设计通用规范》第 1.0.7 款规定“公路桥涵结构应按承载能力极限状态和正常使用极限状态进行设计。承载能力极限状态:对应于桥涵结构或其构件达到最大承载能力或出现不适于继续承载的变形或变位状态。正常使用极限状态:对应于桥涵结构或其构件达到正常使用或耐久性的某项限值的状态”。按《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》规定对预应力混凝土桥梁应进行持久状况承载能力极限状态计算、持久状况正常使用极限状态计算、持久状况和短暂状况构件的应力计算以及弹性荷载(标准荷载组合)的应力控制验算。据验算对比我国规范(JTG D60—2004)、(JTG D62—2004)持久状况承载能力极限状态荷载组合与日本极限荷载相应,持久状况正常使用极限状态荷载组合可应用于顶底板的控制计算,而作应力验算用的弹性荷载组合认为与日本设计荷载相应。

波形钢腹板 PC 箱梁桥为钢-预应力混凝土组合桥,故其设计与施工还应遵守本款未予列出的国家现行预应力混凝土结构、钢结构及组合结构相关的规范、规程与技术标准。我国相应施工规范为《公路桥涵施工技术规范》(JTJ 041—2000),关于钢结构的工程质量控制可参照《钢结构工程施工质量验收规范》(GB 50205—2001)

1.4 结构要点

波形钢腹板 PC 箱梁桥因波形钢腹板的手风琴效应,波形钢腹板 PC 箱梁桥纵向弯曲时由混凝土顶、底板承受轴向力、弯矩,其受力符合拟平面假定。而波形钢腹板承受全部剪力,且剪应力沿高度方向均匀分布。鉴于顶底板预应力索设置空间有限,而应用体外索来弥补体内索之不足则是波形钢腹板 PC 箱梁桥的另一特点。

【说明】

波形钢腹板 PC 箱梁桥较工程习用的 PC 箱梁桥可减少自重,一般认为 PC 箱梁桥的腹板占全体截面的 10%~40%,波形钢腹板是混凝土腹板重量的 1/10 左右,它们之间的重量之差就是所减轻的重量,所以,可以减轻重量 10%~30%。因自重的减轻,地震激励作用效果亦显著降低,故抗震性能较好。

因波形钢腹板的手风琴效应(亦称褶皱效应),波形钢腹板不承受纵向拉、压力,于纵向弯曲计算中可不计入腹板的影响,导致波形钢腹板 PC 箱梁桥刚度较一般 PC 箱梁要小,表 1.4.1 为 PC 箱梁与波形钢腹板 PC 箱梁受力性能比较,从本例中可以看出与一般的 PC 箱梁桥梁(混凝土腹板)相比,波形钢腹板 PC 箱梁桥抗弯刚度约为 90%、扭转刚度约为 40%、剪切刚度约为 10%。

表 1.4.1 PC 箱梁与波形钢腹板 PC 箱梁的受力性能比较

受力性能		单位	①PC 箱梁	②波形钢腹板 PC 箱梁	②/①
跨中	断面积 A	m^2	7.12	5.80	0.81
	断面惯性矩 I	m^4	6.19	5.61	0.91
	扭转惯矩 J_t	m^4	12.31	5.16	0.42
	腹板断面积 A_w	m^2	2.10	0.027	—
	弯曲刚度 $E_c \cdot I$	$\text{kN} \cdot \text{m}^2$	1.92×10^8	1.74×10^8	0.91
	扭转刚度 $G_c \cdot J_t$	$\text{kN} \cdot \text{m}^2$	1.60×10^8	6.71×10^7	0.42
	剪切刚度 $G_c \cdot A_w$	kN	2.73×10^7	2.08×10^6	0.08
根部	断面积 A	m^2	14.94	7.85	0.53
	断面惯性矩 I	m^4	86.60	68.24	0.79
	扭转惯矩 J_t	m^4	95.04	27.37	0.29
	腹板断面积 A_w	m^2	8.19	0.122	—
	弯曲刚度 $E_c \cdot I$	$\text{kN} \cdot \text{m}^2$	1.92×10^9	2.12×10^9	1.10
	扭转刚度 $G_c \cdot J_t$	$\text{kN} \cdot \text{m}^2$	1.60×10^9	3.56×10^8	0.22
	剪切刚度 $G_c \cdot A_w$	kN	2.73×10^8	9.39×10^6	0.034

PC 箱梁桥与波形钢腹板 PC 箱梁桥截面设计参数对比,见图 1.4.1。

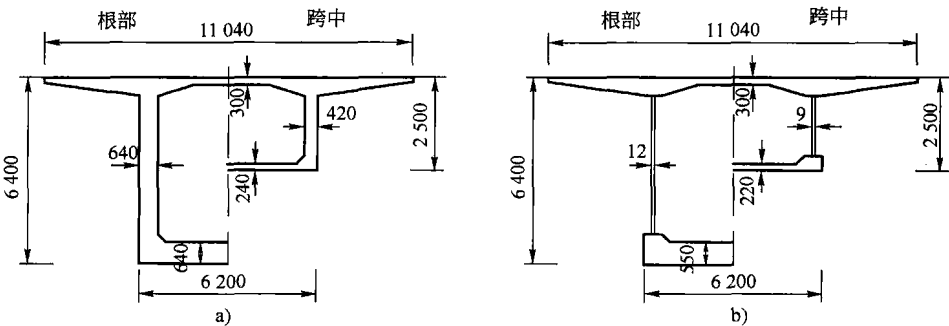


图 1.4.1 PC 箱梁桥与波形钢腹板 PC 箱梁桥截面设计参数对比(尺寸单位:mm)

a) PC 桥;b) 波形钢腹板 PC 桥

注:1. 混凝土抗压强度: $f_{ck}=40\text{N/mm}^2$;2. 混凝土弹性模量: $E_c=3.1 \times 10^4\text{N/mm}^2$;3. 混凝土抗剪弹模量: $G_c=1.3 \times 10^4\text{N/mm}^2$;
4. 钢板弹性模量: $E_s=2.0 \times 10^5\text{N/mm}^2$;5. 钢板抗剪弹模量: $G_s=7.7 \times 10^4\text{N/mm}^2$

因波形钢腹板不承受轴向力,因而纵向预应力索可集中加载于混凝土顶、底板,从而有效地提高了预应力效率。波形钢腹板主要承受剪切力,因腹板剪切应力较大,且箱梁剪切刚度较小,设计中应注意剪切变形对纵向弯曲挠度的影响。

波形钢腹板 PC 箱梁桥的抗扭刚度、横向刚度均较 PC 箱梁桥小,设计中宜注意按适当间距设计横隔以增大其抗扭能力。波形钢腹板与混凝土顶、底板的连接是保证箱梁整体性的关键构造,应注意保证其纵向抗剪、横向抗弯性能。桥梁的振动特性总体上反映了其刚度、质量分布的合理性,上述波形钢腹板 PC 箱梁桥相对于 PC 箱梁桥质量、刚度的变化综合效果,可反映于其振动特性变化上,表 1.4.2 示出了几座波形钢腹板 PC 箱梁桥的振动特性,波形钢腹板 PC 箱梁桥振动特性介于 PC 箱梁桥与钢桥之间,近似于 PC 箱梁桥,故其设计冲击系数可采用 PC 箱梁桥的冲击系数。

表 1.4.2 波形钢腹板桥的自振频率与衰减系数

桥 名		新开桥	银山御幸桥	本谷桥	腾手川桥	小河内川桥
构造形式		简支桥	连续梁	连续刚构	连续刚构	T 梁连续刚构
自振频率 (Hz)	一阶	3.950	2.778	1.648	1.840	1.756
	二阶	5.400	3.167	1.831	2.695	2.491
	三阶	-	3.710	3.235	3.220	5.020
衰减系数	一阶	0.027 0	0.007 0	0.032 0	0.011 8	0.007 3
	二阶	0.034 0	0.008 4	0.021 0	0.009 2	0.006 5
	三阶	-	0.009 5	-	0.009 4	0.005 6

1.5 构造特征

波形钢腹板桥的概念设计的合理性,可用波形钢腹板 PC 箱梁桥的材料用量指标校检。

【说明】

图 1.5.1 为日本已建波形钢腹板 PC 箱梁桥主要材料用量指标与跨度的关系的拟合曲线。

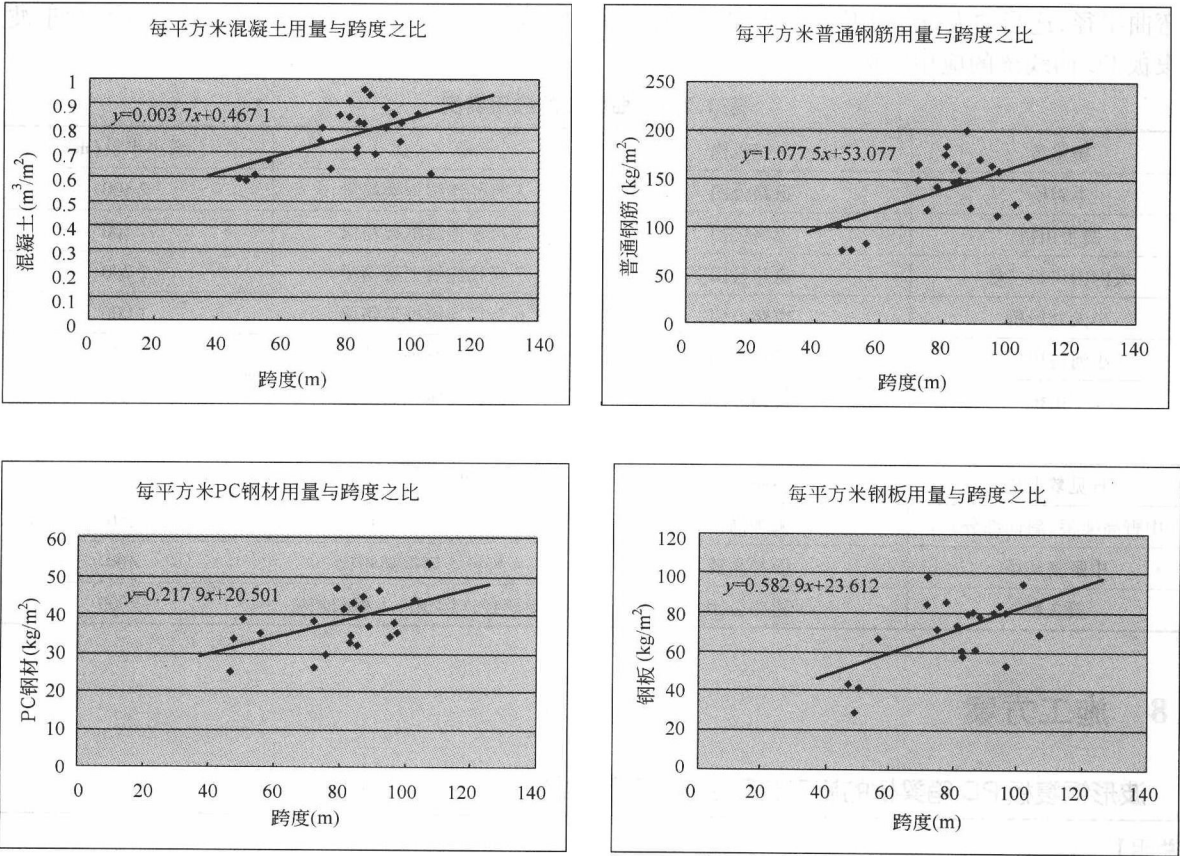


图 1.5.1 波形钢腹板桥的主要材料用量指标

波形钢腹板桥由于腹板被替换成了轻量的钢板,而具有其恒载被减轻等特征,但是腹板本身的工费比起混凝土却要昂贵,因此在进行波形钢腹板的桥梁的概念设计时,应当进行经济成本比较,由于具有恒载减轻的效果,所以必须考虑到下部、基础构造设计之后进行比较,以资全面。据图 1.5.1 中的对比可知波形钢腹板 PC 箱梁桥混凝土量以及主方向 PC 钢材量约可减少 20%。

1.6 桥型

波形钢腹板 PC 箱梁可用于简支梁、连续箱梁、连续刚构等梁式桥,亦可用于部分斜拉桥、斜拉桥乃至拱桥。

【说明】

如表 1.1.1 所示日本已建波形钢腹板 PC 箱梁桥含三种结构形式:梁桥、部分斜拉桥、斜拉桥,最大跨梁式桥为朝比奈川桥,该桥为 7 跨连续刚构桥,最大桥跨达 150.4m。已建波形钢腹板 PC 箱梁部分斜拉桥最大跨径为日见梦大桥,跨径为 180m。已建的最大跨径斜拉桥为矢作川桥,跨径为 235m。

1.7 曲线梁

应考虑波形钢腹板桥比起常用的混凝土腹板桥,腹板的刚度较小这一因素,进行曲线梁桥设计。

【说明】

波形钢腹板 PC 箱梁的扭转刚度比混凝土腹板箱梁扭转刚度小,因此应用于曲线桥时应当留意控制弯曲半径,适当加大抗扭刚度,注意空间分析。作为参考,表 1.7.1 中列示了迄今为止日本对于波形钢腹板 PC 曲线梁的应用实例。

表 1.7.1 曲线梁的应用实例

桥梁名	主持机构	形 式	最小半径(m)
本谷桥	道路公团	3 跨径连续框架箱梁	2 400
腾手川桥	道路公团	3 跨径连续框架箱梁	1 500
大内山川第二桥	道路公团	7 跨径连续框架箱梁	2 200
小犬丸川桥	道路公团	6 跨径连续框架箱梁	1 000
小河内川桥	道路公团	2 跨径连续框架箱梁	7 000
下田桥	道路公团	4 跨径连续框架箱梁	5 000
锅田高架桥	道路公团	3 跨径连续框架箱梁	1 000
日见梦大桥	道路公团	3 跨径连续预应力框架箱梁	1 800
中野高架桥(斜面部分)	阪神高速	4 跨径连续框架箱梁	250
中野高架桥	阪神高速	4 跨径连续框架箱梁	400
栗东桥	道路公团	4 + 5 跨径连续预应力框架箱梁	3 000

1.8 施工方案

波形钢腹板 PC 箱梁桥的施工类同普通 PC 箱梁桥。

【说明】

波形钢腹板 PC 箱梁桥的施工类同普通 PC 箱梁桥,唯波形钢腹板的制作、安装、波形钢腹板与混凝土顶、底板的连接不同于一般 PC 箱梁。波形钢腹板 PC 箱梁总体施工方案类同于 PC 箱梁,可采用支架现浇、整孔预制安装、悬臂浇筑、悬臂拼装、顶推施工等施工方案。鉴于加有上、下翼缘板的波形钢腹板具有一定的弯曲承载力,如加以利用可作施工临时承重结构,因而引发波形钢腹板 PC 箱梁某些专用施工方案的出现,但最常用的仍为支架现浇与悬臂施工法两种。

在波形钢腹板的 PC 箱梁桥的实例中,虽然跨径从 30 ~ 150.4m (除去斜拉桥和部分斜拉桥外)不等,但是在悬臂施工中跨径为 80m 以上的实例比较多。因此,波形钢腹板的 PC 箱梁桥跨径大于 80m 的宜采用悬臂施工方案,小于此跨径的宜采用支架施工。

1.9 维护管理

波形钢腹板桥的概念设计,应考虑寿命周期成本问题。

【说明】

波形钢腹板 PC 箱梁桥维护管理的主要问题为波形钢腹板的防腐问题,这里存在一次性投资与多次性投资的寿命周期成本问题,宜综合考虑。

在涂装方法上,实际应用比较多的是与目前一般的钢箱梁桥一样的涂装,即在外面使用聚氨酯树脂漆等作为罩面涂料的重防腐蚀涂装,在里面使用改良环氧树脂。

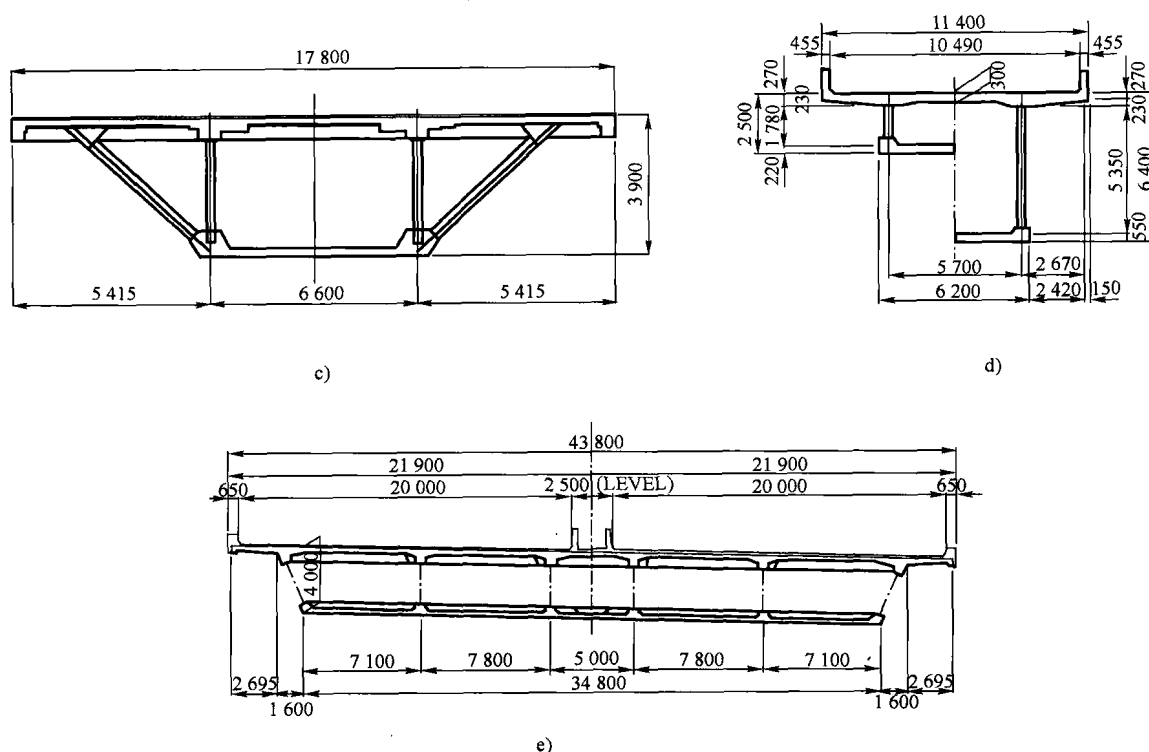


图 2.2.1 波形钢腹板 PC 箱梁桥典型横断面(尺寸单位:mm)

a) 新开桥(单室多箱); b) 小犬丸川桥(斜腹板); c) 桂岛高架桥(带斜撑); d) 本谷桥(直腹板); e) 矢作川桥(单箱多室)

考虑波形钢腹板与混凝土顶、底板连接部的施工性和耐久性等因素,一般宜采用带有翼缘板的波形钢腹板的连接,但是在采用斜腹板的情况下,这一构造会复杂化。另外与直腹板相比较,存在水平方向分力对于屈曲影响的问题,在采用斜腹板的情况下,应当留意这一影响。

单室箱实际应用最大宽度为 17m,对宽桥近年来多室箱梁的应用不少,但在设计中仍应认真细致分析多室箱梁各腹板剪切力的分配与箱梁扭转、畸变应力分析,必要时计算应用较细致、准确的 FEM(有限单元分析)进行。

2.3 梁高

在设计波形钢腹板桥梁的时候,应当根据跨度并考虑波形钢板的制作、施工的难易、波形钢板的搬运条件等因素,来选择梁高。

【说明】

波形钢腹板 PC 箱梁桥纵向受力与 PC 箱梁桥纵向受力类似,其重量可减轻,但刚度亦较低,故波形钢腹板 PC 箱梁桥的总体设计可参照 PC 箱梁桥,其梁高设计亦可参照 PC 箱梁桥。我国 PC 连续梁(刚构)桥根部梁高常取为跨度的 $1/16.7 \sim 1/18.8$,跨中梁高常取为跨度的 $1/35 \sim 1/58$,比起国外常用值偏低,近年来有加高的趋势。对波形钢腹板的 PC 箱梁桥,即使提高梁高,对恒载的影响也是很小的,所以比起混凝土腹板的 PC 箱梁桥,其梁高的选择一般略高于 PC 箱梁桥。

图 2.3.1 表示了根据日本已建波形钢腹板 PC 箱梁桥梁高与最大跨径的关系,从图中可以看出波形钢腹板 PC 箱梁桥的梁高与常用的 PC 箱梁桥的梁高相比梁高偏于上限。鉴于日本大跨度(120m 以上),波形钢腹板 PC 箱梁桥建设经验不多,且考虑波形板屈曲问题,为经济计一味加大梁高未必合理。在日本当 PC 刚构桥的梁高比较低的时候,由于有效断面比较小,导致大地震时的极限弯矩变得更小,