

钢管混凝土空间桁架 组合梁式结构

张联燕 李泽生 程懋方 编著



人民交通出版社

钢管混凝土空间桁架 组合梁式结构

Gangguan Hunningtu Kongjian
Hangjia Zuhe Liangshi Jiegou

张联燕 李泽生 程懋方 编著

北方交通大学

藏

书

图书馆

人民交通出版社

内 容 提 要

本书详细介绍了钢管混凝土空间桁架组合梁式结构的提出及其总体构思,通过在紫洞大桥、向家坝大桥、万州大桥等桥梁工程中的应用情况介绍,说明这种新型组合结构在连续刚构、系杆拱、斜拉桥以及悬索桥等各种桥型中的推广应用价值和发展前景。

本书可供从事桥梁工程设计、施工、科研以及教学的读者参考。

图书在版编目(CIP)数据

钢管混凝土空间桁架组合梁式结构/张联燕等编著. -
北京:人民交通出版社,1999

ISBN 7-114-03263-3

I. 钢… II. 张… III. 钢管结构:钢筋混凝土结构:组合
结构-桁架 IV. U448.33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 05820 号

钢管混凝土空间桁架组合梁式结构

张联燕 李泽生 程懋方 编著

责任印制:孙树田 版式设计:崔凤莲 责任校对:张捷

人民交通出版社出版

(100013 北京和平里东街 10 号)

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经销

北京京华印刷制版厂印刷

开本:850×1168 $\frac{1}{32}$ 印张:4.75 字数:123 千

1999 年 2 月 第 1 版

1999 年 2 月 第 1 版 第 1 次印刷

印 数:0001-3200 册 定价:14.00 元

ISBN 7-114-03263-3

U · 02324

前 言

由顶板(行车道板)、腹板及底板所构成的闭合箱型截面,在对称荷载或偏心荷载作用下,能充分发挥整体受力作用,具有抵抗正负弯矩及扭矩的良好受力性能,因此已成为桥梁设计中优先选用的截面型式。

随着我国交通基础设施的迅速发展及逐步完善,近几年来新建的桥梁日益增多,所采用的桥型除了悬索桥及斜拉桥,其他大多采用连续梁、连续刚构或T型刚构。上述各种桥型,除了悬索桥之外,其主梁一般采用预应力混凝土箱型梁。对于这种结构,我国在设计、施工及试验研究方面已积累了丰富的实践经验。

然而随着桥梁跨径的日益增大,其恒载所占的比例也随着加大,结构承载能力用于承担活载的比例相对减小,承载能力利用系数减小,对能源及材料都是很大的浪费。如何通过利用新材料及采用新结构这两条有效途径,以减轻预应力混凝土箱型梁桥上部结构的恒载,同时采用与之相适应的合理施工工艺,以简化施工程序,减少施工设备,加快施工速度,达到降低造价的目的,这一直是国内外桥梁工程界共同关注的问题。为此,已进行了大量的试验研究,取得了丰硕的成果,并付诸工程实践,积累了宝贵的经验。

在总结与吸取前人经验教训的基础上,笔者认为,采用由钢管混凝土空间桁架与配筋混凝土顶板组成的组合梁式结构,同时采用先逐段组装、平移及合拢空间钢桁架,然后在此基础上逐步予以加强,最终形成组合承重结构的一整套施工方法,是减轻混凝土箱型梁桥上部结构恒载,提高结构承载能力利用系数,有利于施工及降低工程造价的有效途径,也比较符合我国的国情。

通过广东省南海市紫洞大桥的设计、施工及试验研究、湖北省

秭归县向家坝大桥以及四川省万县万州大桥的施工图设计及计算分析,说明这种新型组合结构可以推广应用于整个梁式体系桥梁,也可用于斜拉桥的主梁及悬索桥的加劲梁,具有显著的经济与社会效益。

这种由轻质高强的钢管混凝土与配筋混凝土组合而成的新型组合梁式结构,以及在梁式桥梁中的成功应用,据交通部科技信息研究所对国内外所有相关文献资料的检索,属国内外首创。

紫洞大桥的工程实践已以“钢管混凝土全焊空间桁架单索面斜拉桥研究”为题,列为交通部行业联合科技攻关项目,正准备进行交通部部级鉴定。其余两座大桥尽管正在施工,但通过设计与计算分析,说明这种组合结构是经济合理、安全可靠的,其施工方案也是切实可行的。

本书将详细介绍钢管混凝土空间桁架组合梁式结构在紫洞大桥、向家坝大桥及万州大桥等工程中的应用情况,同时提出这种组合结构的工程技术特点及推广应用价值。笔者期望通过本书,能让桥梁工程界的同行全面了解这种新型的组合梁式结构,并起到抛砖引玉的作用,对桥梁的设计及施工能有所裨益,以共同促进我国交通事业的发展及桥梁工程技术水平的提高。

由于本书涉及面比较广,这种新型的组合结构在桥梁工程中的应用又属初次尝试,书中论述难免有不妥或错误之处,恳请读者提出宝贵意见,不惜指教。

本书的编写分工如下:前言及第一章由李泽生编写,第二章由张联燕、李泽生编写,第三章由李泽生、张联燕编写,第四章由程懋方编写,第五章由李泽生编写,第六章由张联燕编写,全书由李泽生修改统稿。

目 录

第一章 混凝土箱梁结构的优化	1
1.1 结构材料方面	1
1.2 结构构造方面	3
第二章 钢管混凝土空间桁架组合梁式结构的提出及其 总体构思	12
2.1 混凝土箱梁结构优化成果的比较分析	12
2.2 钢管混凝土空间桁架组合梁式结构的提出	15
2.3 钢管混凝土空间桁架组合梁式 结构的总体构思	17
第三章 广东省南海市紫洞大桥主桥的设计、施工及试 验研究	20
3.1 概述	20
3.2 紫洞大桥主桥的总体构思	20
3.3 紫洞大桥主桥的设计、计算及分析	25
3.4 紫洞大桥主桥室内模型试验	38
3.5 钢管混凝土轴向受压强度及受压弹性模量试验	40
3.6 钢管混凝土全焊桁架片的疲劳试验与分析	42
3.7 主梁全焊空间钢桁架及索塔的组装与焊接	51
3.8 主梁空间钢桁架平移施工及监控	56
3.9 主桥钢管混凝土构件的核心混凝土灌注施工	69
3.10 主桥后期施工程序及各阶段的施工观测	71
3.11 主桥钢构件外表面防腐涂装工艺及涂层选择与 施工	74
3.12 主桥的荷载试验与分析	76
3.13 主桥的技术经济比较与分析	95
第四章 湖北省秭归县向家坝大桥设计计算与施工	98

4.1	概述.....	98
4.2	设计与计算分析	100
4.3	施工工艺及程序	118
4.4	主梁施工的关键工序及质量保证措施	119
4.5	工程技术特点	120
4.6	主要材料用量指标及技术经济效益	123
第五章 钢管混凝土全焊空间桁架组合梁式		
	结构的结构与工程技术特点	126
5.1	结构材料	126
5.2	杆件连接形式	127
5.3	结构形式与受力性能	127
5.4	施工机械设备与临时设施	128
5.5	技术经济效益	130
第六章 钢管混凝土空间桁架组合梁式		
	结构的推广应用与发展前景	131
6.1	四川万县万州大桥设计简介	131
6.2	钢管混凝土空间桁架组合连续刚构的发展前景	134
6.3	钢管混凝土空间桁架组合梁式结构在系杆拱中 的应用前景	134
6.4	钢管混凝土空间桁架组合梁式结构在特大跨径 斜拉桥中的应用前景	137
6.5	钢管混凝土空间桁架组合梁式结构在特大跨径 悬索桥中的应用前景	142
6.6	结束语	143
主要参考文献		146

第一章 混凝土箱梁结构的优化

为了减轻混凝土箱梁结构的自重,提高结构承担活载的比例,即提高承载力利用系数,进一步增大结构跨越能力,国内外在研制轻质高强新材料以及采用新型结构方面,已进行了大量的试验与研究工作,并取得了许多有价值的成果。

1.1 结构材料方面

结构材料的变革必然引发结构形式及其构造的更新,这是一般的规律。因此结构的优化,往往都从研制及采用新的结构材料入手。

由于材料的强度越高,桥梁的跨越能力越大,二者成正比,而材料质量越小,桥梁的跨越能力也越大,二者成反比。因此,欲增大桥梁的跨越能力,采用轻质高强的结构材料往往是很有效的。作为工程结构两大材料的钢与混凝土,混凝土在我国普遍采用,发展混凝土品种,逐渐改善其性能,依然是我国桥梁工程界共同关心的重要问题。

1.1.1 采用高强或超高强普通混凝土

提高普通混凝土的强度等级,采用高强普通混凝土($50\text{MPa} < \sigma_c^{28} < 100\text{MPa}$)或超高强普通混凝土($\sigma_c^{28} > 100\text{MPa}$),是减小预应力混凝土桥梁上部结构截面尺寸,减少其自重的有效途径之一。日本谷田内昌熙在《超高强混凝土》一文中列举了同跨径、同形式而不同强度的预应力混凝土铁路桥(四梁式)的比较表(表 1-1),从表中可以看到采用高强或超高强普通混凝土的优越性。

不同混凝土强度的预应力混凝土梁(I 型截面，

铁路桥)的比较表

表 1-1

混凝土抗压强度 (MPa)	跨 径 (m)	梁 高 (m)	梁的高跨比	混凝土体积 (四根梁时)(m ³)	梁重力(每片) (kN)
40	50	3.1	1 : 16	262	1 650
80	50	2.1	1 : 24	176	1 100
120	50	1.7	1 : 30	145	910
40	80	5.8	1 : 14	872	5 450
80	80	3.6	1 : 22	506	3 150
120	80	2.8	1 : 29	391	2 450

日本是采用高强混凝土最多的国家,大部分用于公路桥,其混凝土强度等级均在 C70 以上,最高达 C100。国外混凝土箱梁已有采用 C80 混凝土的工程实例,以减小其腹板及底板的厚度。

1.1.2 采用聚合物混凝土

聚合物混凝土包括树脂混凝土(PC)、聚合物水泥混凝土(PCC)及聚合物浸渍混凝土(PIC)。美国对这三种聚合物混凝土进行了大量的研究工作,其中最有成果的是 PIC。由于聚合物填充了混凝土的全部空隙,形成有机与无机的复合材料,力学性能显著提高,不但抗压强度可达 100MPa 以上(最高可达 180MPa~240MPa),其他力学性能也普遍提高了几倍,收缩、徐变值也显著减小。

1.1.3 采用轻质混凝土

美国首先开发应用结构轻质混凝土(LWC),60 年代以后也曾不断用于桥梁工程;前联邦德国在 1971 年建成的芙林格尔湖桥,是跨径为 52.8m+135m+52.8m 的双箱单室三跨连续梁,在中孔跨中 84m 长度范围内采用轻质混凝土代替普通混凝土,混凝土容重为 16.1kN/m³,立方体强度为 36.5MPa,以减轻上部结构的自重。国外用于承重结构的 C30~C60 预应力轻质混凝土,容重为

$16\text{kN/m}^3 \sim 20\text{kN/m}^3$, 其应用范围局限于中、小跨径桥梁。

1.2 结构构造方面

配筋混凝土箱型结构是梁式体系桥梁上部结构普遍采用的结构形式。但由于其自重大,工期较长,施工设备及临时设施的费用较高,已制约其跨越能力的进一步加大。

配筋混凝土箱型结构的截面尺寸几经优化,目前欲使其进一步轻型化已很困难。其中占总重量 $40\% \sim 50\%$ 的车行道顶板,必须承受车辆荷载及抵抗弯矩,而且必须满足纵向预应力筋的设置要求,尽管可以施加横向预应力,但其外形尺寸已基本确定。占总重量 $20\% \sim 25\%$ 的底板,在连续结构的根部,必须承受负弯矩而产生的压应力,在其他区段必须考虑纵向预应力底板索的设置及施工的要求,需有其最小的厚度。而占总重量 $30\% \sim 40\%$ 的腹板,往往是纵向预应力管道必经之地,同时要考虑截面抗剪的要求,也基本上已确定了最小的厚度。尽管如此,但仍有进一步优化的可能。因此,为了从结构构造方面减轻配筋混凝土箱型结构的自重,目前国内外主要是针对其腹板进行优化。

1.2.1 混凝土实体腹板的优化

国内外在保留混凝土实体腹板的前提下,所采取的腹板优化措施大致有以下三种。

一是在腹板内设置竖向预应力筋,对腹板施加竖向预应力,减小荷载产生的主拉应力,提高斜截面的抗剪强度,以减薄腹板厚度。

二是在箱型截面内,利用横隔板及设于底板上的转向块设置纵向体外预应力筋,取消混凝土内的纵向预应力筋,腹板内可不设预应力管道,从而减小腹板厚度。

三是在不影响预应力筋布设的前提下,将腹板沿高度方向改变厚度,以压缩腹板面积。

1.2.2 采用平面钢腹板替代混凝土腹板

将混凝土腹板改为平面钢腹板,形成钢—混凝土组合箱型结构。

法国首先提出这种组合结构,并进行了跨径为 20m 的模型试验。其试验荷载模拟实桥的恒载,并进行 200 万次疲劳试验;测定永久荷载作用下,经 463 天后混凝土收缩、徐变而引起的顶板、底板及腹板的应力变化。通过静载、动载及破坏荷载试验,表明这种组合箱型结构完全可以用于实桥。用于试验的模型构造见图 1-1。

法国的 Ferté-Saint-Aubin 桥是采用这种组合箱型结构的典型工程实例,该桥跨径 38m,桥面宽 7.5m,梁高 1.625m,钢腹板厚度 12mm,在腹板 1/3 及 2/3 高度处设有水平加劲肋,全桥采用体外预应力。

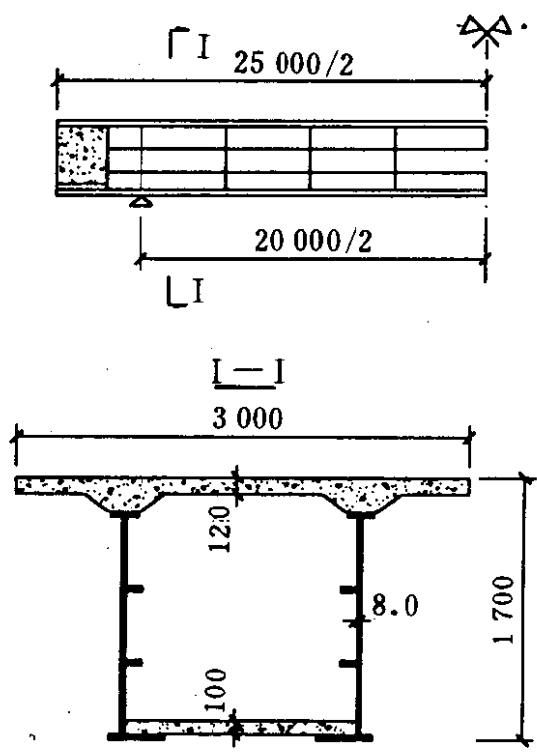


图 1-1 模型构造(尺寸单位:mm)

1.2.3 采用波形钢腹板替代混凝土腹板

法国 CB 公司于 1975 年提出用波形钢腹板(沿桥梁纵轴方向呈波形)替代平面钢腹板,并进行了模型试验。试验结果表明:在轴向压缩或纯弯曲情况下,波形钢腹板的应力几乎都为零,亦即轴向压缩或纯弯曲主要由混凝土顶底板承受,而 87% 的剪力及 75% 的扭矩由波形钢腹板承受,有一小部分由顶底板承担。模型试验的实测结果与用有限元进行的空间计算结果十分吻合,说明这种结构可用于实桥。从 1986 年开始,法国先后建成了 Cognec 桥、Maupré 桥及 Asterix 桥。此外,日本从 1993 年开始,先后修建了新开桥及松木七号桥。

上述 Cognec 桥是第一座采用波形钢腹板组合箱型结构的实桥,建于 1986 年。该桥是跨径为 31m+43m+31m 的等截面三跨连续梁,梁高 2.285m,其波形钢腹板厚度 8mm,箱梁自重为 10.2t/m。该桥的横截面形式见图 1-2。

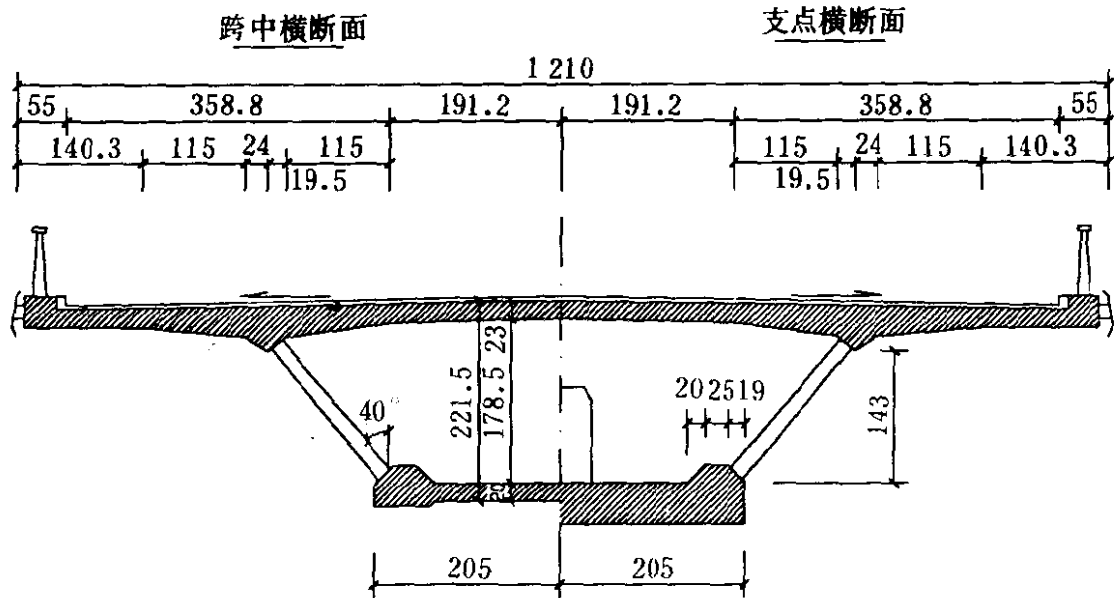


图 1-2 Cognec 桥的横截面(尺寸单位:cm)

法国的 Maupré 高架桥是另一座采用波形钢腹板组合箱型结构的七跨连续梁桥。该桥采用三角形箱型截面,其下弦为 $\phi 610\text{mm} \times 20\text{mm}$ 的钢管混凝土杆件,顶板厚度 20cm,梁高 3.0m,波形钢腹板厚度 8mm,全桥纵向布设 16 根体外预应力筋。全桥材料用量为:混凝土 $0.27\text{m}^3/\text{m}^2$,预应力钢材 $19\text{kg}/\text{m}^2$,普通钢筋 $54\text{kg}/\text{m}^2$,钢板 $82\text{kg}/\text{m}^2$ 。主梁自重 $7.7\text{t}/\text{m}$,与同跨径预应力混凝土连续梁桥相比,自重减轻 36%。该桥总体构造轻巧新颖,经济合理,造型美观。其总体布置及横截面见图 1-3。

法国 CB 公司已成功设计了数座主跨达 400m 的三跨波形钢腹板组合箱型连续梁桥,采用悬臂施工法,使用了移动式波形钢腹板架设车,然后现浇顶底板混凝土。有关资料表明,这种桥型与同跨径预应力混凝土梁桥相比,可节约成本约 30%。

这种组合结构有其独特的结构特点,技术经济效益显著,但在我国尚未获得应用。

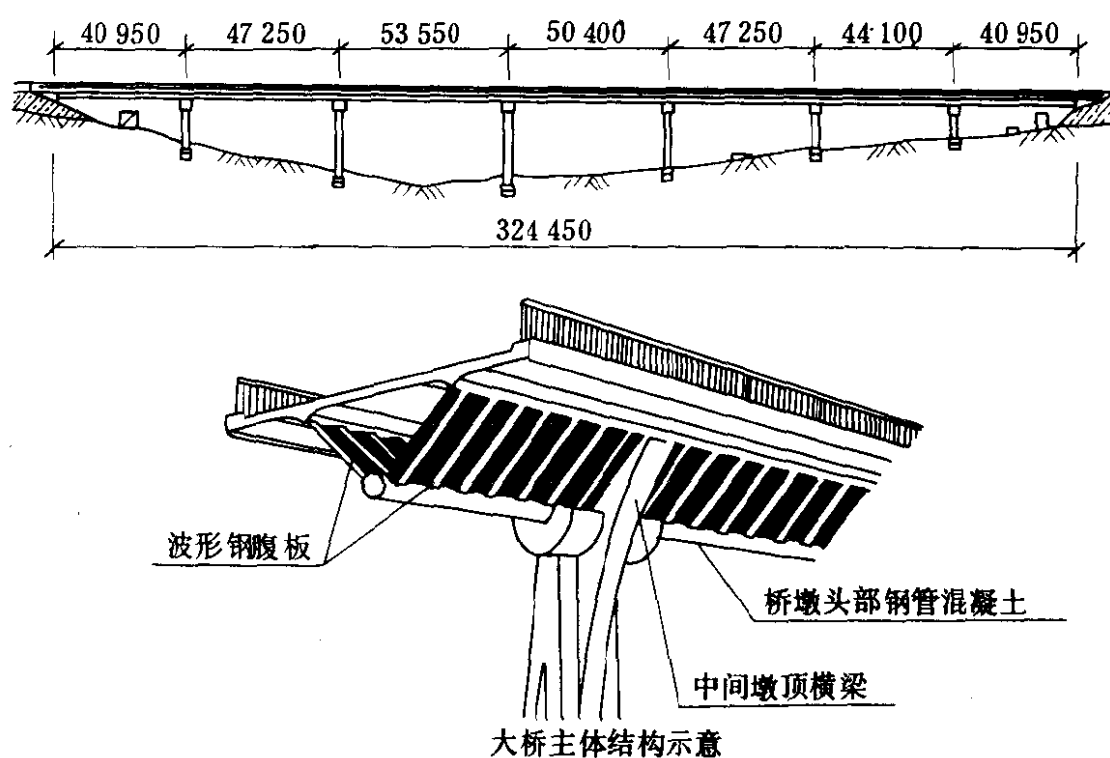


图 1-3 Maupré 高架桥(尺寸单位:mm)

1.2.4 将混凝土腹板改为“替代腹板体系”

所谓“替代腹板体系”,即采用桁架或带洞的腹板取代实体腹板,以减轻腹板自重。

一、采用混凝土空间腹杆取代混凝土腹板

科威特的布比延桥是采用这种结构的典型工程实例。该桥于 1983 年建成,共 59 跨,分 11 联,每联由五跨或六跨组成,除了通航孔跨径为 53.84m,其余标准跨的跨径为 40.16m。桥面全宽 18.2m。

该桥上部结构采用配置体外预应力索的钢筋混凝土空间构架,由预制的 16 个三角形构件与现浇的顶、底板组成一个拼装节段,如图 1-4 所示。

该桥标准跨由 2 段长 1.84m 的墩顶节段及 8 段长 4.56m 的标准节段组成,节段之间采用设置多重组合键的干接缝,由纵向体外预应力索连成整体。通航主跨比标准跨多三段标准节段,并不改变外形及尺寸,因此减少了节段类型。该桥的标准跨节段布置见图 1-5。

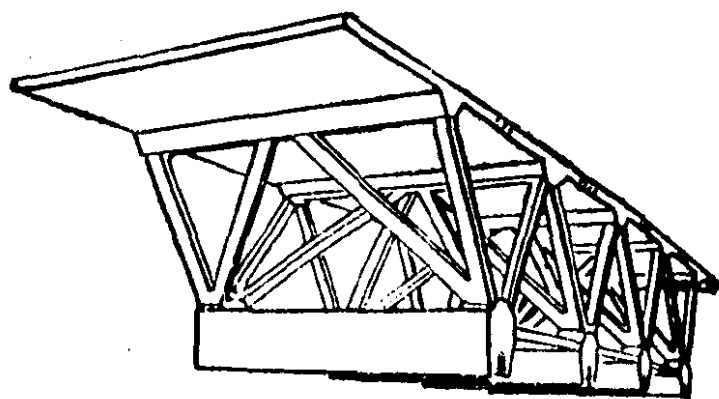


图 1-4 布比延桥的拼装节段

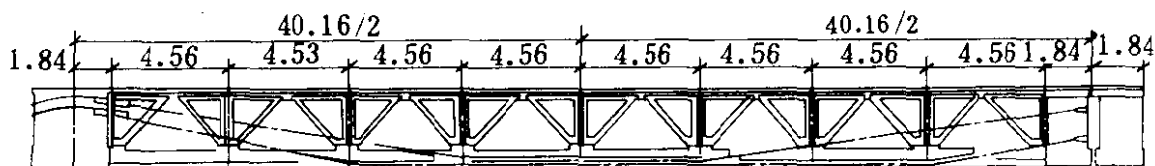


图 1-5 布比延桥标准跨节段布置(尺寸单位:m)

布比延桥墩上节段及标准节段均采用二次预制完成,其吊装重力分别为 637.4kN 及 843.4kN,利用斜拉钢导梁逐孔拼装节段来完成上部结构的架设,最快为 24h 可拼装一孔。

该桥采用由空间腹杆及顶底板构成的空间构架取代箱型结构,能节省混凝土 20%,预应力钢材 30%,同时减轻了施工吊装重量及上部结构的自重,加快了施工速度。此外减小了顶板的横向跨径,减小了结构的畸变内力,加强了结构的整体性及其刚度。总之,布比延桥是一座在结构型式及施工方法等方面均具有特色的桥梁。

二、采用平面钢桁架取代混凝土腹板

由平面钢桁架与混凝土顶、底板组成的组合结构,由于其腹板为平面钢桁架,与混凝土箱型结构相比,大幅度减轻了上部结构的自重,对剪力流变也有利,而且提高了结构的抗震性能。

这种结构型式已在欧美,特别是欧洲的许多实桥上采用,Arbois 桥的上部结构属于这种类型。该桥为跨径 29.85m + 40.40m + 29.85m 的三跨连续梁,桥面宽 11.0m,混凝土顶底板厚度分别为 20cm 及 16cm。该桥的总体布置及节点构造见图 1-6。

另一座采用这种结构的典型实桥为 Roize 桥。该桥为跨径

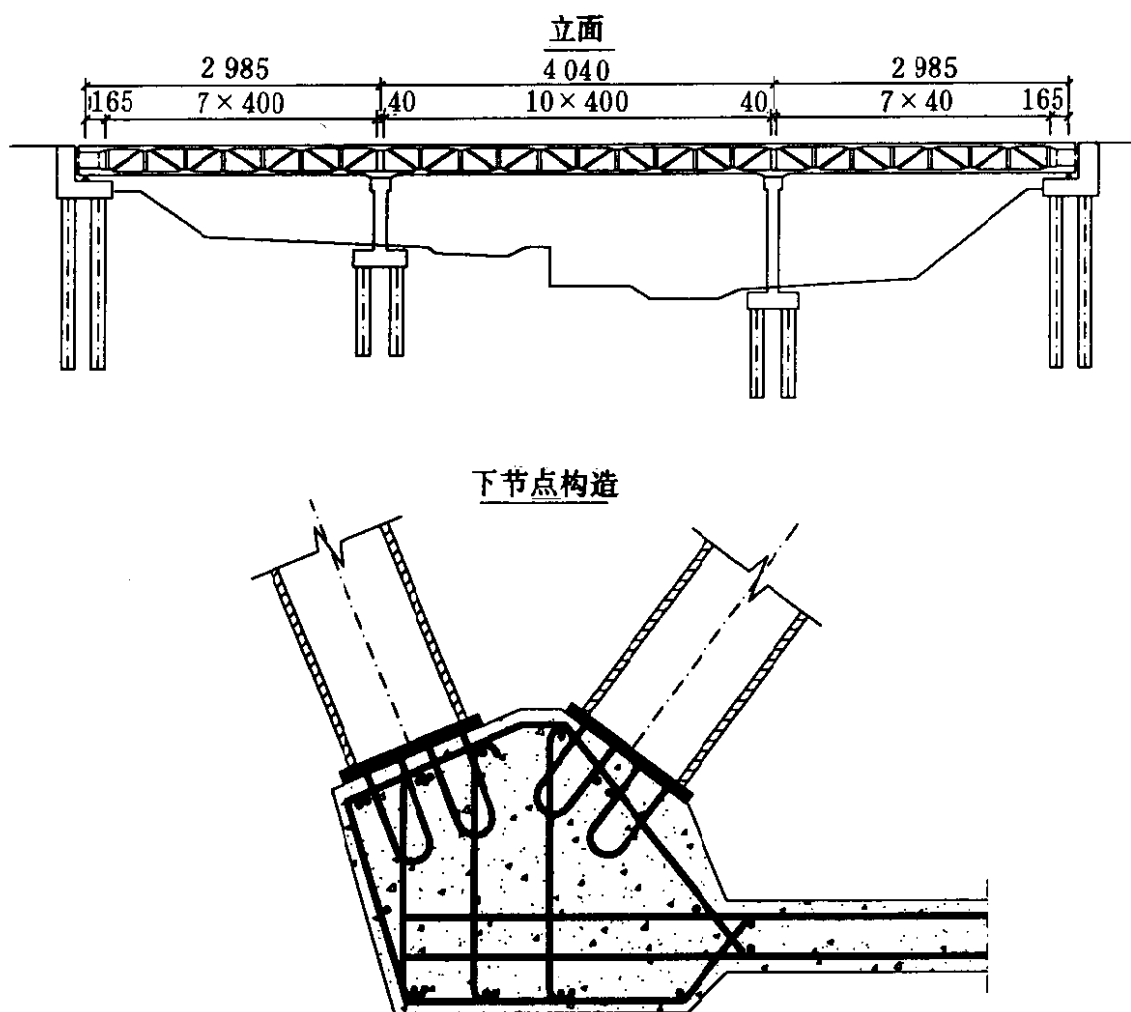


图 1-6 Arbois 桥的总体布置及下节点构造(单位:cm)

36m+40m+36m 的三跨连续梁,横断面为三角形,梁高 2.31m,设置了 5 根规格为 12T15 体外预应力索,如图 1-7 所示。

日本学者对这种结构的变截面连续梁进行了详细的计算分析,其一般构造及尺寸详见图 1-8 及表 1-2。其中孔中央 $L/3$ 长度范围内,由于下弦杆抗拉强度已足够,不需设置预应力筋,因而不必设底板。

平面钢桁架箱型组合梁尺寸(m)

表 1-2

	A 桥	B 桥	C 桥	备 注
桥 长	460.0	584.0	900.0	
全 宽	16.4	20.2	20.2	
行车道宽	15.0	$2 \times 8.5 = 17.0$	$2 \times 8.5 = 17.0$	
L_1	180.0	240.0	380.0	净跨径、顶板厚 25cm

续上表

	A 桥	B 桥	C 桥	备 注
L_2	130.0	160.0	240.0	底板厚 70cm、顶板厚 30cm
L_3	10.0	12.0	20.0	
a	30.0	30.0	60.0	底板厚 60(100)cm
b	10.0	10.0	20.0	底板厚 60(100)~25cm
c	20.0	40.0	40.0	底板厚 25cm
d	60.0	80.0	140.0	不设底板
h_1	6.0	7.0	15.0	
h_2	13.0	17.0	30.0	
h_3	5.0	5.0	10.0	
H	60.0	40.0	60.0	
B	2.5	2.5	3.0	

注：括号内的值为 C 桥尺寸。

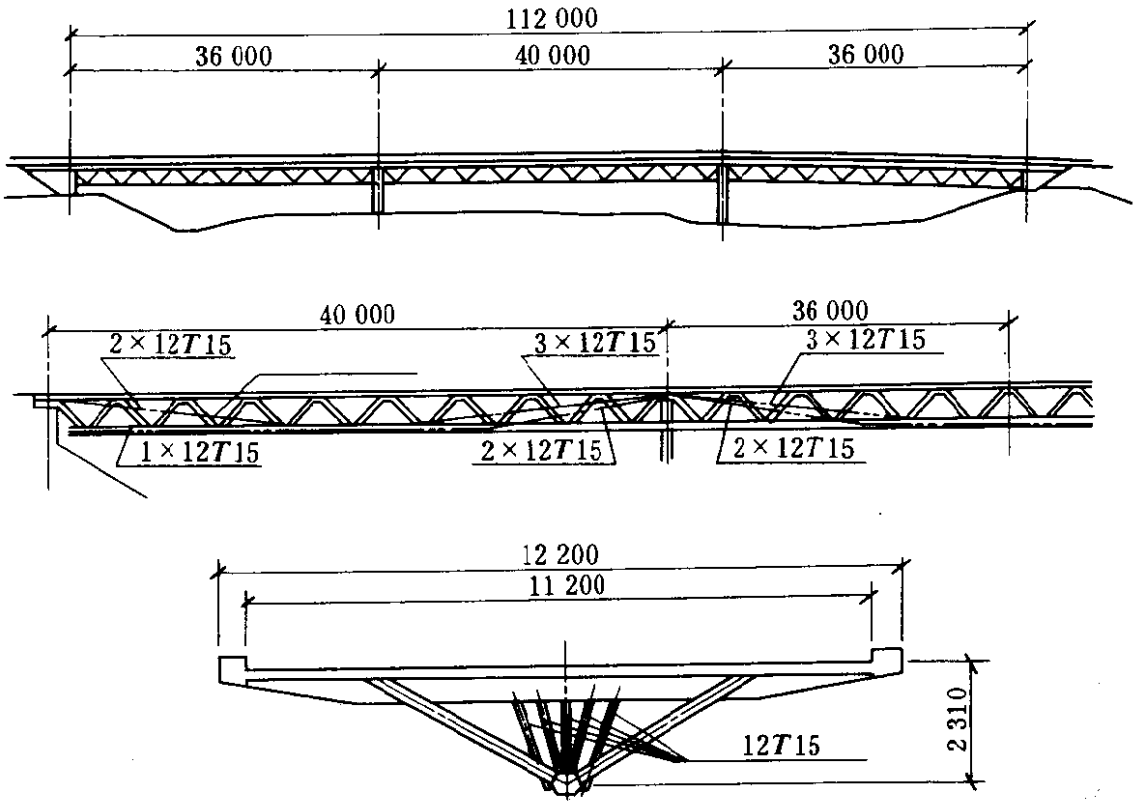


图 1-7 Roize 桥的一般构造(尺寸单位:mm)

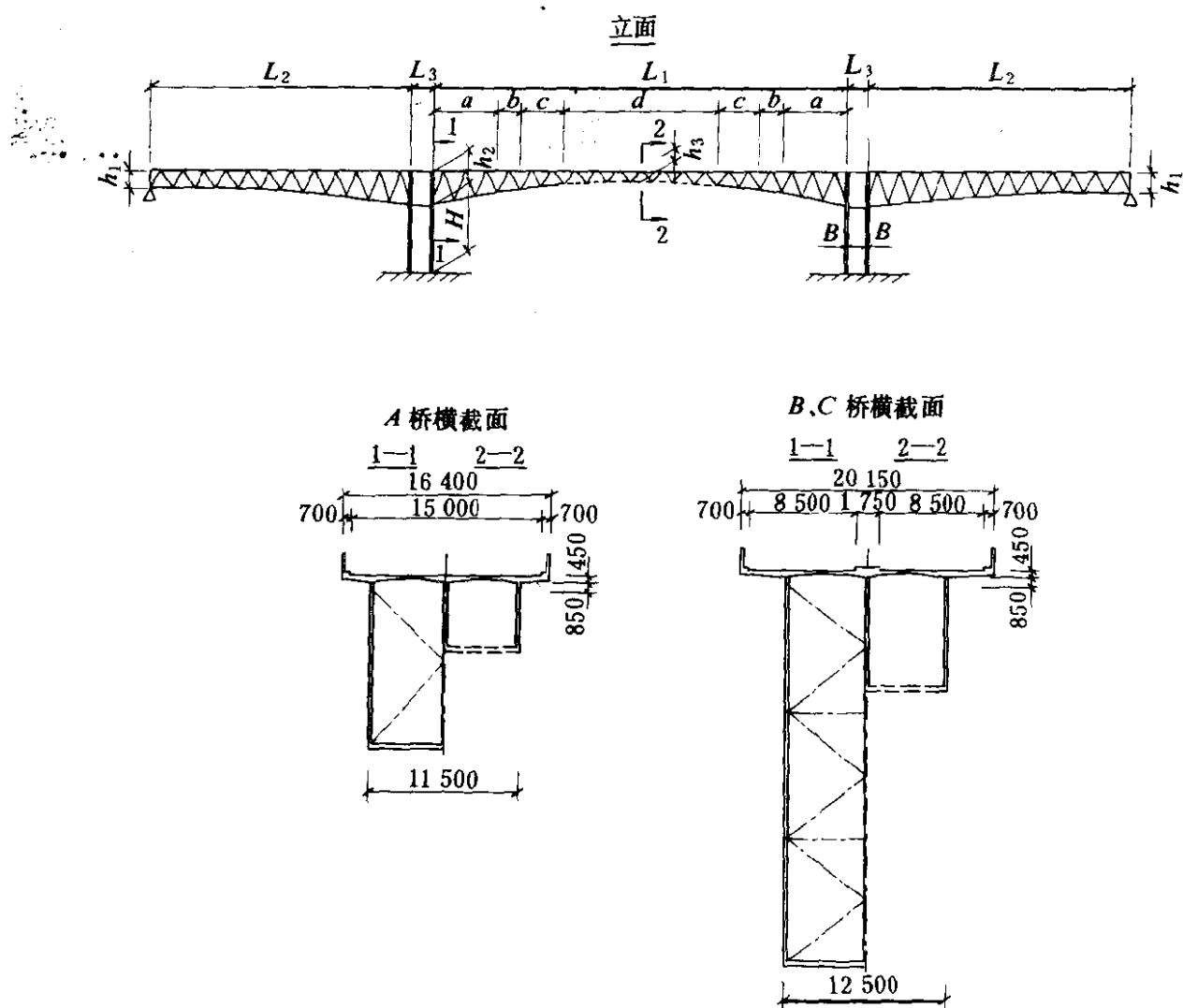


图 1-8 平面钢桁架组合梁桥构造(尺寸单位:mm)

计算分析结果表明:

1. 每车道墩顶的弯矩约为一般混凝土箱梁的一半。
 2. 中孔跨中活载弯矩占总弯矩的 12.3%~19.4%。
 3. 固有周期均较长,属于免震结构。
 4. 节省了工程投资费用。以 B 桥为例,比同跨径斜拉桥节省 31%,比同跨径的钢箱梁桥节省 53%。
 5. 桥面板施加纵向预应力时,不会对其他部位产生较大的负弯矩作用。
 6. 上部结构轻,经济性好,跨越能力大。
- 三、采用带孔的混凝土腹板
- 因工程实例很少,不拟赘述。