

城市空间结构设计 施工技术研究

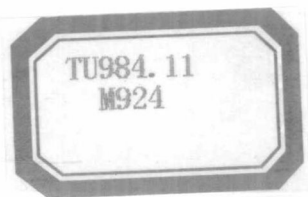
CHENGSHI KONGJIAN JIEGOU
SHEJI SHIGONG

- 板桁组合桥梁结构
- 城市地下空间结构

JISHU YANJIU

牟在根 宁平华 吴坚如 杨润林 张举兵◎编著





郑州大学 *04010807088-*

城市空间结构设计 施工技术研究

牟在根 宁平华 吴坚如 编著
杨润林 张举兵



中国铁道出版社

2011年·北京

TU984.11
M924

内 容 简 介

本书注重理论与应用相结合,力求做到实用性、完整性和可读性。在内容上与我国相应的规范与规程相一致,并吸取国内外相关学科的科研成果和实践经验。本书分两篇,第1篇阐述板桁组合桥梁结构,通过数值模拟分析组合桥梁整体受力性能和剪力连接件的受力规律;第2篇介绍了地下结构工程的计算方法和施工要点;最后附录给出了组合结构梁桥节点构造图集和地下工程防水构造图集。

本书可供土木工程设计、科研、施工等单位工程师、科技人员以及高等院校土木工程专业师生参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

城市空间结构设计施工技术研究/牟在根等编著. —北京:中国铁道出版社,2011. 10
ISBN 978-7-113-13454-9

I. ①城… II. ①牟… III. ①城市空间—空间结构—结构设计—研究②城市空间—空间结构—工程施工—研究 IV. ①TU984. 11

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 178399 号

书 名: 城市空间结构设计施工技术研究

作 者: 牟在根 宁平华 吴坚如 杨润林 张举兵 编著

责任编辑: 陈小刚 电话: 010-51873065 电子邮箱: cxgsuccess@163.com

封面设计: 崔 欣

责任校对: 张玉华

责任印制: 李 佳

出版发行: 中国铁道出版社(100054,北京市西城区右安门西街8号)

网 址: <http://www.tdpress.com>

印 刷: 北京信彩瑞禾印刷厂

版 次: 2011年10月第1版 2011年10月第1次印刷

开 本: 880 mm×1230 mm 1/16 印张: 15.25 字数: 491 千

书 号: ISBN 978-7-113-13454-9

定 价: 70.00 元

版权所有 侵权必究

凡购买铁道版的图书,如有缺页、倒页、脱页者,请与本社读者服务部联系调换。

电 话: 市电(010) 51873170, 路电(021) 73170(发行部)

打击盗版举报电话: 市电(010) 63549504, 路电(021) 73187

前 言

城市空间结构是城市基础设施建设项目很重要的组成部分,随着中国城市化进程的发展,城市空间结构形式呈现出多样性,追求受力更加合理、结构更加可靠和使用更加耐久。结合工程建设实践,广州市市政工程设计研究院与北京科技大学一起就城市建设中应用越来越多的板桁组合结构以及城市地下空间结构开展了产学研合作研究,就此类结构涉及的相关关键技术问题进行了比较系统深入的科学研究。本书反映的有关科研成果,希望能与我国相关工程技术人员和学者共勉。

书中第一篇就板桁组合结构在城市应用的结构特点、受力特性、结构设计、构造细节和经济技术等方面进行系统的分析和研究,相关成果具有较强的应用价值,其中研究了板桁组合桥梁结构的整体受力性能,包括混凝土板厚度的影响和桁架刚度的影响以及各个构件承担的荷载比例等;研究了板桁组合结构的剪力连接件的受力规律,并给出剪力连接件栓钉的布置方案及其计算方法;研究了混凝土桥面板的有效宽度,其中考虑板厚、宽跨比、高跨比、纵梁刚度等的影响,最终给出有效宽度的修正计算公式。第二篇结合城市地下空间应用,对地下空间结构的设计与施工技术进行了分析研究,对该类结构特点、结构—土相互作用、施工工法、防水、抗浮、沉降控制及注浆处理等关键技术作了较全面的分析,并给出了地下结构设计的计算方法。最后,附录给出了 50m、70m 跨径板桁组合结构梁桥节点构造图集和地下工程防水构造图集,可以为地下工程结构设计与施工提供参考。本书所反映成果内容是理论结合工程实践,“产学研”合作研究成果的结晶,既解决关键技术问题,又进行经济对比分析,具有较强的理论指导意义和工程应用价值。

本书相关课题的研究得到了国家自然科学基金委员会研究课题的大力支持,同时在本书的编写过程中,参考了很多已经公开发表的文献和资料,为此谨向这些作者表示真挚的感谢。

由于编者水平有限,书中论述不当或错误之处在所难免,敬请读者批评指正。

编 者

2011 年 10 月国庆节

目 录

第 1 篇 板桁组合桥梁结构

第 1 章 板桁组合结构简介	3
1.1 发展概况	3
1.2 结构特点	6
1.3 研究情况	6
1.4 综合分析	13
第 2 章 板桁组合梁数值模拟	15
2.1 模型基本情况	15
2.2 设计规范及标准	15
2.3 模型建立	16
2.4 计算过程	25
2.5 其他跨径模型与计算	33
第 3 章 桥梁整体受力性能	41
3.1 混凝土板厚度的影响	41
3.2 构件承担的荷载比例	42
3.3 桁架刚度的影响	43
第 4 章 剪力连接件研究	45
4.1 剪力连接件的选型	45
4.2 栓钉受力规律	46
4.3 栓钉布置与计算	49
第 5 章 桥面板有效宽度研究	51
5.1 计算方法与模型	51
5.2 计算结果分析	52
5.3 有效宽度修正公式	57
第 6 章 混凝土桥面板应力分析	59
第 7 章 施工期杆件内力检算	65
第 8 章 经济技术指标对比	67
结 论	68

参考文献	69
------------	----

第 2 篇 城市地下空间结构

第 9 章 地下工程的研究概况	73
-----------------------	----

9.1 引 言	73
9.2 地下工程的应用	76
9.3 地下工程计算理论的发展	76
9.4 地下工程的施工	77
9.5 地下工程结构的特点	78

第 10 章 地下工程设计的计算方法及实例	79
-----------------------------	----

10.1 地下结构工程的计算方法	79
10.2 具体工程实例	81
10.3 小 结	121

第 11 章 地下工程防水问题研究	122
-------------------------	-----

11.1 地下工程防水	122
11.2 地下工程刚性防水	126
11.3 地下工程柔性防水的施工	128
11.4 密封防水	131
11.5 注浆防水	133
11.6 地下工程渗漏水的治理	135
11.7 小 结	136

结 论	138
-----------	-----

参考文献	139
------------	-----

附录 A 50 m、70 m 跨径板桁组合结构梁桥节点构造图集	141
---------------------------------------	-----

附录 B 地下工程防水图集	176
---------------------	-----

第 1 篇 板桁组合桥梁结构

第1章 板桁组合结构简介

钢筋混凝土桥面板与钢桁梁上弦杆通过剪力钉相结合从而共同受力的组合结构称为板桁组合结构。钢桁架是由上、下弦杆与腹杆构成的安定体系,从很早以前就被用在桥梁结构中。桁架桥的各杆件仅仅承受轴力,与同时又承受弯矩及剪力的板梁桥、箱梁桥相比较,用钢量并不随跨径的增加而大幅度的增加。以往的桁架桥设计,通常是在弦杆节点设置横梁,通过横梁将桥面板的荷载传给主桁,而不考虑桥面板的作用,但是,实际上桥面板在桥梁纵向具有比较大的刚度,约束了上弦杆的变形。如果能够确保钢桁梁上弦与桥面板有效地结合在一起,积极地考虑两者的结合作用,桁架桥梁体系将更加趋于合理。

板桁结合结构与常用的板梁(或箱梁)结合梁的主要差别在于:板梁(或箱梁)结合梁主要受弯剪作用,纵向力几乎为零;板桁组合结构除了受弯、剪作用外,还承受巨大的纵向压力。把上弦杆和混凝土板用剪力连接件结合在一起,主要目的是使混凝土板帮助钢桁梁上弦杆抗压,同时可以增加桥梁刚度和稳定性。

采用板桁组合结构,具有便于设计双层桥面,增加桥梁刚度,降低桁高,减少公路桥面伸缩缝数量,提高行车舒适度的优点。

1.1 发展概况

1. 国外板桁组合结构发展概况

1962年联邦德国修建了世界上第一座钢板桁组合结构公路桥,即富尔达长塔桥(Fulda tal),其上部结构为七跨上承式连续梁(79.2+91.2+107.84+143.20+107.84+91.20+79.2)m,1971年该国在同一地区又建成一座相同类型的桥梁。此后,又在罗腾堡地区建成跨度达152m的下承式双线铁路板桁组合钢桥。后来,在荷兰、丹麦和日本也相继出现了这种桥型的桥梁。

2. 我国板桁组合结构的发展

1976年,我国铁道部大桥工程局设计院在广东西江公铁两用桥设计中提出了板桁组合结构方案,是国内第一个钢板桁组合的五跨连续梁桥梁设计方案。当时的大桥局桥梁研究所进行了该桥模型试验和理论分析,西南交通大学亦作了理论分析。后因一些原因,没有付诸施工,该桥的方案变更为一般连续钢桁梁。

1995年铁道部大桥工程局设计芜湖长江公铁两用斜拉桥时,提出了主梁为板桁组合连续梁方案,后也因其他原因改为组合结构。

2000年,我国建成了第一座板桁组合结构的桥梁—安徽芜湖长江大桥,板桁组合结构应用于斜拉桥的加劲梁。图1-1-1为芜湖长江大桥照片。



图1-1-1 芜湖长江大桥

芜湖长江大桥位于芜湖市西侧,是 20 世纪末在长江上修建的最后一座公铁两用桥梁,它的建设对缓解长江客货运输紧张,加速华北地区特别是芜湖和安徽的发展有重要社会和经济意义,列为国家基本建设“九五”重点工程项目。芜湖长江大桥由铁道部和安徽省共同出资修建,总投资 30 亿元,于 1996 年 9 月开工。铁路桥位于既有的峪溪口编组站和芜湖小杨村编组站之间,全长 5 681.2 m,正桥在芜湖市广福矶处跨越长江,全长 2 193.7 m,桥跨组成为(120 m+2×144 m)+(2×3×144 m)+(180 m+312 m+180 m)+(2×120 m)。孔数为 14 孔,全桥耗用 14MnNbq 钢材总量为 71 894 t。

芜湖长江大桥上部结构形式设计中由于受航空、航道、现有编组站标高的限制,正桥不能采用混凝土刚构或连续梁,也不能采用按通常涉及比例的斜拉桥,只能采用低塔、斜拉索加劲的连续钢桁架结构,以满足航空和大跨度铁路桥梁有关技术标准。

(1)芜湖长江大桥主桥的主要技术标准(表 1-1-1)

表 1-1-1 芜湖长江大桥主桥的主要技术标准

项 目		内 容
设计荷载	铁路荷载	双线中—活载
	公路荷载	四线汽—超 20
	人群荷载	3 kN/m ²
检定荷载	主体结构	1.4×(中—活载)
	纵横梁及局部受力杆件	1.5×(中—活载)
刚度标准	挠度比	双线铁路活载,边跨挠度比为 1/800,中跨挠度比为 1/650 公铁加载边跨挠度比为 1/700,中跨挠度比为 1/550
	宽跨比	边跨宽跨比:1/20,中跨宽跨比:1/25

(2)芜湖长江大桥的结构形式

在芜湖长江大桥的斜拉桥结构中,主桥连续梁和斜拉桥全面采用了混凝土桥面板和主桁相结合共同作用的板桁结合结构,有利于降低主梁高度,提高桥梁刚度。钢梁全部采用整体节点,具有节省材料、安装工作量少、进度快、节点整体性好的特点,此外公路钢筋混凝土桥面板与钢桁梁结合共同受力,减少了公路面伸缩缝数量,提高了行车舒适度。

铁路桥面因直接承受列车荷载,仍采用纵横梁体系,公路桥面系为格子梁系统,横梁间距为 12 m,设在主桁节点处,纵梁间距为 4~4.5 m,均为工型截面。

芜湖桥钢桁梁斜拉桥采用 N 型桁架,桁宽 12.5 m,高 13.5 m,节间长 12.0 m,共 56 个节间,其中主跨 26 个,边跨各 15 个。主塔两侧各设 8 对斜拉索,索梁锚点处设副桁与主桁连接。主桁连接采用 30VB 钢 M30 高强螺栓,钢桁采用栓焊整体节点形式,由于杆件的高度与节点的长度之比达 1/7.2,且大部分为刚度大的箱形结构,次应力大,基本上为初应力的 5%~25%,个别为 30%,整个结构的应力比较复杂。

桁架杆件截面依据轴力大小,采用 H 型和带有加劲肋的箱形截面。杆件宽 1 100 mm,上弦杆高 1 446 mm,下弦杆高 660 mm,腹杆高 700~1 100 mm,杆件最大长度 15.1 m。杆件板厚从 10 mm 到 50 mm 不等,最大板厚 50 mm,最大杆件吊重 36 t。大桥公路横梁高 1 460 mm,纵梁高 1 000 mm,铁路横梁高 2 161 mm,纵梁高 1 480 mm,下平联为交叉形,不设上平联,仅在支点处设置强劲桥门架,不设中间横梁。桥面系与联结系构件使用 M24 高强螺栓连接。图 1-1-2 为芜湖长江大桥加劲梁构造示意图。

桁架的每个节间共有 5 块预制混凝土公路桥面板,通过 M22 剪力钉与主桁上弦结合与主桁共同受力,桥面板为现场预制,存放 6 个月时间,以减少混凝土的收缩、徐变,工地现浇接缝采用微膨胀混凝土。

由于桥梁钢板采用厚板、整体节点及大断面带肋箱形杆件,大量使用承受拉应力和疲劳应力的对接焊缝,平联节点板及横梁腹板与主桁节点的联结均采用焊接,焊接构件尺度大、刚度大、构造复杂且封闭不易检查,铁路列车荷载又具有集中力大、冲击力大的特点等,因此,确保焊接结构具有足够的韧性和塑性以防断裂(脆断)是该桥钢梁设计的重点。

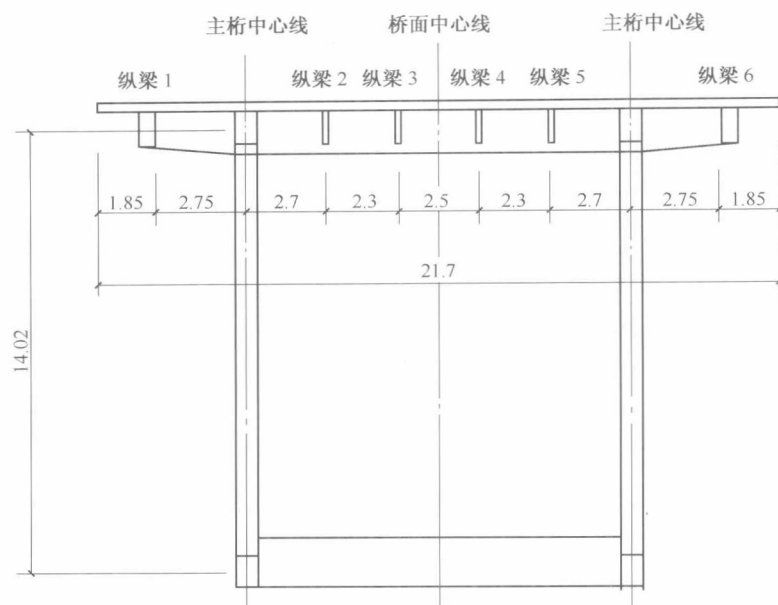


图 1-1-2 芜湖长江大桥加劲梁构造示意图(m)

(3) 科学研究

板桁组合结构的关键技术是混凝土板与主桥的结合,而芜湖桥斜拉桥和连续钢桁梁均采用混凝土板与主桁上弦结合共同受力的板桁组合结构。由于组合梁规模特别大,国内外板桁结合梁桥的参考资料很少。为确保结合桥梁正常工作和满足使用要求,在芜湖桥的设计过程中通过收集资料、技术咨询和试验研究,重点研究了以下一些问题。

① 混凝土板的收缩徐变和钢与混凝土弹性模量的比

在长期荷载作用下,混凝土的收缩、徐变与环境、湿度、混凝土标号、水泥及龄期等有关。在主体结构分析中,根据指导性施工组织设计,按安装程序及混凝土板存放龄期进行混凝土收缩、徐变影响的历程分析。

对于短期荷载,各种规范有不同的规定,但大部分规范对短期荷载(包括活载)均不考虑混凝土的收缩、徐变影响。

② 对栓钉在 C50 混凝土中抗剪极限承载能力、疲劳、栓钉长度、间距、配筋率与栓钉的匹配、群钉组合件极限承载力和疲劳承载力等进行了基础性的试验研究。根据试验成果并参考国内外有关规范,制定了栓钉设计的条款及质量验收标准。确定了在 C50 混凝土并使用容许应力法设计时,栓钉的设计承载力为 50 kN,疲劳应力幅 $\Delta\sigma=25$ MPa。

③ 为减少接缝混凝土对结构耐久性和整体性的影响,并且导入预应力并不经济,参考欧洲广泛使用现浇混凝土板代替预制混凝土板建造结合梁桥(包括桁架结合梁桥),用高配筋率(3%~4.8%)代替预应力,不再追求用预应力防止混凝土板开裂,限制拉应力,而代之以控制混凝土板的裂缝宽度,使之满足规范关于裂缝限值的要求。

在连续桁梁支点附近,桥面板中活载产生的拉应力较大,由于钢桁梁刚度大,难于在接缝混凝土中直接施加预应力。芜湖桥采用钢梁起落顶的办法在桥面板中形成压应力,但由于收缩、徐变的影响及加载龄期不可能太长,压应力的损失较大,因此在接缝处采用高配筋混凝土,以期限制裂缝的宽度。

参考国外的实验结果,在芜湖桥中采用整体现浇高配筋混凝土板,在疲劳荷载作用下,负弯矩区裂缝分布比较分散,裂缝宽度可以控制不超过 0.2 mm。负弯矩区采用预应力预制桥面板和高配筋现浇接缝混凝土,有可能在接缝界面上出现裂缝超限值,从而影响结构的耐久性。为此,结合受拉区栓钉工作的研究及混凝土板接缝钢筋的构造形式研究,进行了模拟实验,并拟在接缝处采取辅助的防渗措施。

(4) 桥面板的安装

桥面板的安装方法采用座浆法,座浆用 C50 的砂浆和橡胶条密封。桥面板出厂前已对其外形尺寸进行检查,误差控制在验标范围内。

安装前先在钢梁上贴橡胶条,橡胶条厚度比实际抄垫厚 2 mm 左右(考虑压缩变形),然后在橡胶条内侧

垫相应规格的水泥块,再把拌好的砂浆均匀铺垫,与橡胶条同高。吊装桥面板时不能碰撞钢梁上的剪力钉和斜拉索,四周的伸出钢筋要能顺利穿过剪力钉,并使桥面板平稳地落在设计位置上。

芜湖长江大桥的建成,为我国板桁组合结构桥梁的建设积累了宝贵的经验。

1.2 结构特点

钢-混凝土组合结构近年来发展较快,但应用较多的是将混凝土板与钢板梁(或钢箱梁)相结合的板梁组合结构,而不是板桁组合结构。板桁组合结构与常用的板梁组合结构相比,其特点是:

(1)除了受弯、剪作用(由局部荷载引起)外,主要受巨大的纵向力作用,而且,纵向力由节点处集中传入。由此决定了以下两个问题。

- ① 剪力连接件在节点范围内成密集型布置;
- ② 结合构件承载力对钢与混凝土弹性模量比的取值较敏感。

(2)为缩短工期,混凝土桥面板预制,但与钢桁梁上弦杆结合处的混凝土必须是工地现浇。其传力途径为钢桁梁节点→剪力连接件→工地现浇混凝土→预制混凝土板。新、老混凝土之间结合状况的好坏也是板桁组合结构成败的关键之一。

(3)活载大,疲劳问题突出。

1.3 研究情况

板桁组合结构的关键技术是混凝土板与主桥的结合。由于国内外板桁结合梁桥的参考资料很少,为确保结合桥梁正常工作和满足使用要求,我国曾在芜湖长江大桥的设计和建造过程中做了大量、系统的理论分析和试验研究。国内外关于板桁组合结构桥梁的研究内容和成果主要包括以下一些内容:

1. 剪力连接件

在组合结构中,由于不同截面的竖向剪力不同,导致钢与混凝土之间存在较大的剪应力,为此必须设置抗剪连接件。钢混组合结构中,抗剪连接件按照形式分类大致有钢筋连接件、型钢连接件、圆柱头焊钉连接件、开孔钢板连接件及其钢与有机材料组合连接件。

(1)钢筋连接件

钢筋连接件依靠焊接在钢板上的螺纹钢筋承担与混凝土间的剪力,其主要形式为弯起钢筋、轮型钢筋及螺旋钢筋的连接件。还可把钢筋焊在型钢上使用,这样可以增大延性,加强两者间的接合,如马蹄型连接件,它是比较常用的把钢筋焊接在型钢上的连接件之一。图 1-1-3 为各种形式的钢筋连接件。

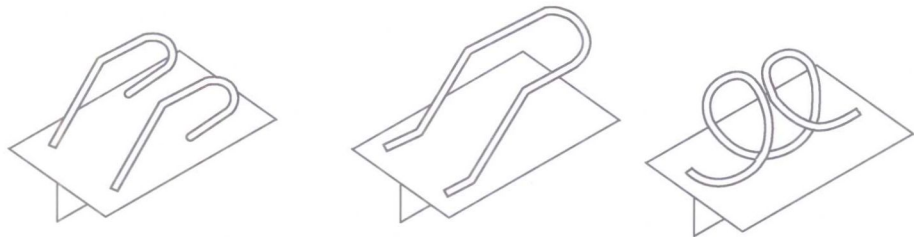


图 1-1-3 钢筋连接件

(2)型钢连接件

通常采用贴角焊缝焊接到钢板上,焊接量很大,钢板上会产生较大的应变。另外,型钢连接件的抗剪强度很大,可是在极限状态下会发生钢板与混凝土完全分离的可能性。图 1-1-4 示出用型钢的各种形式的连接件。

(3)圆柱头焊钉连接件

图 1-1-5 为焊钉连接件,它的力学性能不具有方向性,不像钢筋连接件和型钢连接件那样要考虑受力方向进行设置,此外,焊钉连接件使用专用焊接机,焊接方便,质量容易保证,因此在钢混组合结果中被广泛使用。

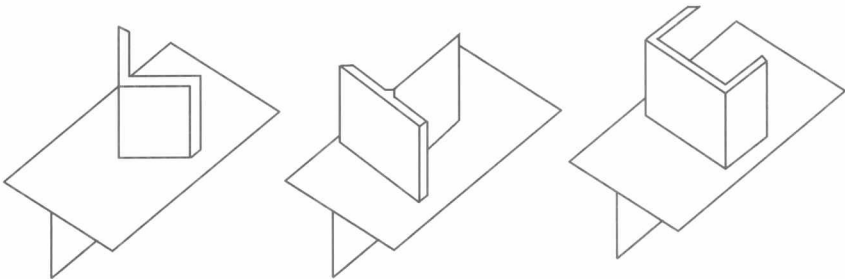


图 1-1-4 型钢连接件

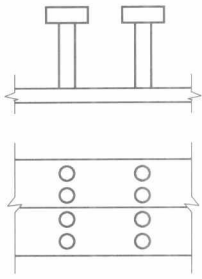


图 1-1-5 圆柱头焊钉

许多研究者对焊钉连接件在单个设置时的抗剪承载力进行了研究,并提出了各自的计算方法,表 1-1-2 为几个具有代表性的计算公式, $k_1 \sim k_7$ 表示常数。

表 1-1-2 抗剪承载力的既往研究

研究代表者	表现形式	计 算 式
Slutter, R. G.	公式	$Q_u = k_1 d_s^2 \sqrt{f_c} (h_s/d_s \geq 4.2)$ $Q_u = k_2 d_s h_s \sqrt{f_c} (h_s/d_s \leq 4.2)$
Menzies, J. B.	图表	$Q_u \sim f_c$
Ollgaard, J. G.	公式	$Q_u = K_3 A_s \sqrt{f_c E_c}$
Hawkins, N. M.	公式	$Q_u = K_4 A_s \sqrt{f_u f_y} / \sqrt{d_s}$
Roik, K.	公式	$Q_u \leq K_5 d_s^2 f_y$ $Q_u/d_s^2 \sim f_c$
Hiragi, H.	公式	$Q_u = K_6 A_s \sqrt{(h_s/d_s) f_c} + K_7$

圆柱头焊钉作为连接件使用时有时会受到拉拔力,当所受到拉拔力相对于剪力很大时又称为锚栓。受到纯拉拔力作用时的焊钉的破坏模式有焊钉拉断、焊钉拔出、焊钉圆锥形破坏、混凝土压坏和混凝土割裂破坏。表 1-1-3 为抗拉拔承载力的计算式。

表 1-1-3 抗拉拔承载力的既往研究

研究代表者	计算式	系数 k_0 值
Leigh-University	$N_u = k_0 (D_s + H_s) H_s \sqrt{f_c}$	1.207
Sattler K.	$N_u = k_0 D_s H_s f_c$	0.953
Utescher G.	$N_u = k_0 H_s^2 f_c^{2/3}$	0.964
CEB-ECCS	$N_u = k_0 h_s^2 \sqrt{f_c}$	1.283
PCI Deign Dada Book	$N_u = k_0 (D_s + H_s) H_s \sqrt{f_c}$	1.207
Bode H.	$N_u = k_0 (D_s + H_s) \sqrt{H_s} \sqrt{f_c}$	11.3
McMackin P. J.	$N_u = k_0 \sqrt{2\pi} (D_s + H_s) H_s \sqrt{f_c}$	0.272
Otani Y.	$N_u = k_0 (D_s + H_s) \sqrt{H_s} \sqrt{f_c}$	11.3
Hiragi H.	$N_u = k_0 \pi (D_s + H_s) H_s f_c^{2/3}$	0.227

(4)开孔钢板连接件

开孔钢板连接件是指依据钢板圆孔中的混凝土承担钢与混凝土间的作用力的新形式连接件,沿钢梁纵向设置,依靠圆孔中的混凝土加强两者间的连接。与焊钉连接件相比,其抗剪刚度与抗疲劳性能都得以提高,并且钢板的圆孔可以贯通钢筋,不影响钢筋的布置。图 1-1-6 为开孔钢板连接件示意图。

(5) 钢与有机材料组合连接件

在焊钉根部或型钢腹板等处设置树脂海绵或泡沫塑料,这种用钢与有机材料组合在一起的连接件,称之为组合连接件。将组合连接件根据需要设置在不同部位,能够极大地提高组合结构的力学性能。

我国在芜湖长江大桥设计中,采用 $\phi 22$ 圆柱头焊钉,对焊钉在 C50 混凝土中抗剪极限承载能力、疲劳、栓钉长度、间距、配筋率与栓钉的匹配、群钉组合件极限承载力和疲劳承载力等进行了基础性的试验研究。根据试验成果并参考国内外有关规范,制定了栓钉设计的条款及质量验收标准。确定了在 C50 混凝土并使用容许应力法设计时,栓钉的设计承载力为 50 kN,疲劳应力幅 $\Delta\sigma = 25$ MPa。

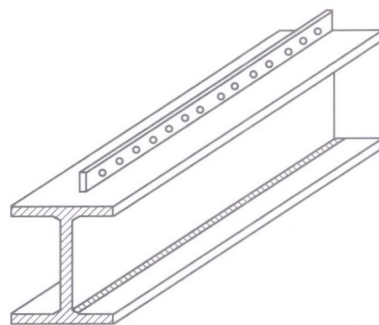


图 1-1-6 开孔钢板连接件

① 钢与混凝土弹性模量比的研究

钢的弹性模量 E_s 基本不随时间变化,可看作常数。但混凝土却因收缩、徐变等因素的影响,其弹性模量 E_c 会随龄期(t/d)而变化。对结合梁进行内力分析时,通常将混凝土板的面积换算成钢的,换算中涉及到钢与混凝土的弹性模量比值 $n = E_s/E_c$ 。由于混凝土收缩、徐变的影响, n 为较难掌握的系数。混凝土的收缩、徐变将导致板桁组合结构中产生附加应力,由于板桁组合结构桥梁跨度往往较大,且截面高度较高,混凝土收缩、徐变引起的结构内力不可忽略。在长期荷载作用下,混凝土的收缩、徐变与环境、湿度、混凝土标号、水泥及龄期等有关。关于混凝土长期弹性模量的计算主要有以下几种方法。

a. 龄期调整的有效模量法,即用降低弹性模量来考虑混凝土的徐变影响,其混凝土弹性模量计算公式为:

$$E_{c(t,t_0)} = \frac{E_c(t_0)}{1 + \chi(t,t_0) \cdot \varphi(t,t_0)}$$

式中 $E_c(t_0)$ ——混凝土的初始弹性模量,一般取为 $t_0 = 28$ d 时的弹性模量;

$\chi(t,t_0)$ ——龄期调整系数;

$\varphi(t,t_0)$ ——混凝土的徐变系数。

b. 欧洲模式规范 CEB-FIP MC90 采用了如下一个简单的计算公式,来考虑混凝土弹性模量随龄期的增长变化:

$$E_c(t) = E_c(t_0) \sqrt{\beta_t}$$

$$\beta_t = \exp \left[s \left(1 - \sqrt{\frac{28}{t}} \right) \right]$$

其中, s 取决于水泥种类,普通水泥和快硬水泥取为 0.25,快硬高强水泥取为 0.20。

c. 我国水利水电专家朱伯芳教授提出的弹性模量的双曲线和复合指数计算公式为:

双曲线公式
$$E_c(\tau) = \frac{E_0 \tau}{c + \tau}$$

复合指数公式
$$E(\tau) = E_0 (1 - e^{-a\tau^b})$$

式中 a, b, c ——表征变化速率的参数,需要根据实验拟合;

E_0 ——最终弹性模量;

τ ——龄期。

在芜湖长江大桥的主体结构分析中,根据指导性施工组织设计,按安装程序及混凝土板存放龄期进行混凝土收缩、徐变影响的历程分析。

对于短期荷载,各种规范有不同的规定,但大部分规范对短期荷载(包括活载)均不考虑混凝土的收缩、徐变影响。

② 对剪力滞后效应的研究

梁在弯曲荷载下,由于梁的腹板中面内剪切应变的行为使得翼缘板部分的纵向位移出现差别:在腹板两侧处翼缘板的纵向位移落后于在腹板处的翼缘板的纵向位移。这种现象称为剪力滞后现象。

板桁组合结构中混凝土桥面板支撑在钢桁梁上直接承受汽车荷载,桥面板在体系受力中存在较明显的

剪力滞后现象。研究剪力滞后现象就是为了能确定翼缘板上的弯曲应力的分布状态,进而能用有效宽度的方法为设计提供参考。

通常在对各类型的梁进行剪力滞后分析中采用的方法有以下几类:比拟杆法、能量变分法、有限条法、折板法、有限元法。

以 T 型梁为例,比拟杆法是将由翼缘板和腹板共同承担的内力模拟化为由一块加劲板与一根下弦杆组成的等代结构来承担,加劲板由加劲杆和系板组合而成,并假定轴向力由各加劲杆承担,系板仅传递剪力,梁上的竖直剪力仅由腹板承担。通过求解系板内的剪力流函数,并据此积分可得到加劲杆内的轴向力函数,由轴向应力在翼缘板内的分布状况就能对翼缘板的有效宽度进行折算。

仍以 T 型梁为例,能量变分法中假定翼缘板由于剪切变形的滞后影响其纵向位移沿宽度方向呈高次曲线变化,腹板的变形仍符合平面假定,翼缘板竖向应变为零,板平面外的剪切应变及板的横向应变忽略不计。能量变分法是首先分析结构体系的总势能 Π 的构成,它由外荷载势能和梁体应变能组成,其中梁体应变能由腹板的弯曲应变能和翼缘板的弯曲应变能及面内剪切应变能所组成。根据势能最小原理: $\delta\Pi=0$, 进行变分分析可得到关于剪力滞后问题的基本微分方程,求解该方程可得到翼缘板纵向位移沿板宽的分布函数,进而可得到弯曲应力在翼缘板上的分布状态。

有限元法是将连续结构离散为由若干个单元组合而成,各单元满足平衡条件和变形协调条件,通过位移函数来假定单元的端点位移与单元内位移的关系,再推导单元的平衡方程,编制程序对结构进行求解。在剪力滞后效应的分析中,如果单元类型及位移函数选择适当、单元划分足够细,其有限元分析的结果通常认为是精确解。随着计算机技术的发展,计算能力的提高,现在通常都采用有限元方法对结构进行剪力滞分析。

标准的有限元法是沿各个方向采用多项式的位移,有限条法则只需沿某些方向采用简单多项式,沿其他方向则为连续可微的级数,位移函数由多项式与级数的乘积给出,这样可将一个条的二维问题简化为一维问题,从而在结构分析中减少计算的工作量。用类似有限元分析方法来分析条的应变能与外力势能并按势能原理推导的平衡方程,便可编制程序对结构进行计算。由于在翼缘板横向划分为多个的条,计算结果便能得到弯曲应力在翼缘的横向分布状态。如果梁的腹板及翼缘板均较薄,则可视为薄板来处理,由翼缘板和腹板构成折板系结构,按薄板的理论对梁进行分析。对折板系结构可以将其离散为一系列的板单元,便可用类似有限元的方法进行计算。

对板桁组合结构剪力滞后效应的分析计算有其特殊的地方,但目前鲜见有相关研究的文献报道。由于板桁结构是由混凝土板与钢桁梁相结合的构造形式,因此对板桁结构的剪力滞分析可以认为是对结合梁的剪力滞分析中的一种特例。在对结合梁的剪力滞分析中,早期的研究是运用薄板理论分析混凝土桥面板,考虑板与梁的完全连接,对在使用荷载下结合梁的有效宽度进行分析。近期的一些研究还考虑了滑移对有效宽度计算的影响及在极限荷载作用下的有效宽度的确定,在对实桥的有效宽度计算时通常的作法是采用空间有限元方法,对桥面板弯曲应力的横向分布进行计算,再据此确定桥面板的有效宽度,或是直接按结合梁的设计规范来确定有效宽度。

③混凝土板的有效宽度的研究

鉴于剪力滞后现象的存在,各国规范对结合梁设计中翼缘有效宽度的确定提出了不同的要求,大多数使用的规范中对有效宽度的计算采用的都是很简单的公式。表 1-1-4 为各类规范对结合梁有效宽度的计算公式。

表 1-1-4 结合梁有效宽度计算表

规 范	公 式	备 注
SS3110	B_e 取其中最小者: (1) $L/4$; (2) B ; (3) $12D$	规范也包括边梁。 L 为跨度; B 为腹板中心距; D 为混凝土板厚
CEB	$B_e = L/8$ 均布荷载; $B_e = L/10$ 集中荷载	L 为连续梁反弯点间的距离
CP110	B_e 取其中最小者: (1) $b_f + L/5$; (2) B	L 为连续梁反弯点间的距离; b_f 为腹板中心距; B 为板宽

续上表

规 范	公 式	备 注
CP117 卷 1 英国:型钢和混凝土构成的组合结构建筑部分	B_e 取其中最小者: (1) $L/3$; (2) B ; (3) $b_f+L/5$	规范也包括边梁。 L 为跨度; B 为腹板中心距, b_f 为腹板中心距; D 为混凝土板厚
CP117 卷 2 英国:型钢和混凝土构成的组合结构桥梁部分	(1)当 $B \leq L/10$ 时: $B_e=B/2$; (2)当 $B > L/10$ 时: $(B_e/B)^2=1+12(B/L)^2$	L 为跨度; B 为板宽
DIN1078 联邦德国规范	(1)当 $B/L < 0.1$ 时: $B_e/B=1$; (2)当 $B/L=0.1$ 到 0.6 时: $B_e/B=0.89$ 到 0.5 ; (3)当 $B/L > 0.6$ 时: $B_e/B=0.3$	L 为跨度; B 为板宽
BS5950 英国:建筑中的钢结构应用	(1)简支梁: B_e 为 $L/4$ 和 B 中的最小值。 (2)连续梁: 正弯矩区:等代简支梁有效宽度的 0.7 倍; 负弯矩区:等代简支梁有效宽度的 0.5 倍	L 为跨度; B 为板宽; 等代简支梁为两弯矩为零点的梁段

其中英国标准 BS5400(钢桥、混凝土桥及结合桥)对结合梁翼缘板有效宽度的规定是基于 20 世纪 60 年代到 70 年代以英国为主的大量对钢梁和结合梁剪力滞后分析的计算、模型试验的科研成果得出的。由于剪力滞后的影响随宽跨比、荷载分布、荷载类型、截面类型、截面尺寸、翼缘材料特性、边界条件、跨度布置、截面纵向位置的不同而变化,因此规范条文说明中讨论了上述诸多因素对有效宽度确定的影响,并制定出相应的要求。

关于芜湖桥桥面板有效宽度的计算,有学者采用空间有限元的分析方法,得出了混凝土桥面板有效宽度的数值分析方法。芜湖桥板桁结合梁混凝土板中的纵向力主要通过节点处栓钉集中传入。对某一节间的混凝土桥面板,远处节点处传入的纵向力传至本节间混凝土板时已充分分散,即混凝土板已全截面有效。只有本节间节点处增加的纵向力还未充分分散,有效宽度 $b_e=b\psi$ 各处不一, ψ 可按表 1-1-5 取值。

表 1-1-5 各截面的有效宽比 ψ

x/b	1/8	1/4	3/8	1/2	5/8	3/4
ψ	0.19	0.38	0.54	0.69	0.80	0.88
x/b	7/8	1	5/4	3/2	$\geq 7/4$	
ψ	0.93	0.96	0.98	0.99	1.0	

注: b 为桥面板宽度的一半, x 为截面位置。

④受拉区结合梁的试验研究

在我国芜湖长江大桥的设计中,连续桁梁支点附近的桥面板中活载产生的拉应力较大,为此,对芜湖桥受拉区结合梁做了 4 根大梁的综合模拟试验。研究了混凝土裂纹分布与发展、钢梁和钢筋与混凝土中应力分布变化、刚度变化、栓钉布置、钢筋连接、钢与混凝土结合性能、新老混凝土结合性能、极限状态等问题。

如果采用简支梁结构,则不存在受拉区的问题。

⑤板桁组合结构计算方法的研究

板桁组合结构兼有板结构与空间桁架结构的特性。目前国内外对板桁组合梁结构的力学行为研究得并不多,国内外文献中报道了以下一些板桁组合梁结构的主要计算方法。

a. 浦田昭典法

1972 年日本学者浦田昭典、山村信道在伊藤学、友田纯夫、宫崎藤失等人的研究基础上提出板桁组合结

构的近似算法:即将钢桥面板视为上弦杆的一部分,采用钢桥面板的有效宽度,不考虑钢桥面板屈曲及剪力滞后影响,假设竖向荷载在上弦杆 AB 区间所产生的轴向力的符号相同(图 1-1-7)。则在 AB 区间上轴力分布采用了富氏级数展开为:

$$N(x) = \sum_{n=1}^{\infty} N_n \sin a_n x$$

式中 $a_n = \frac{n\pi}{L_x}$;

L ——区间 AB 的长度。

$$N_n = -\frac{2}{n\pi} \sum_{i=1}^n N_{i,j+1} (\cos a_n x_{i+1} - \cos a_n x_i)$$

假定 AB 区间弦杆截面不变,则在弦杆中产生的正应力为:

$$\sigma_x = \sum_{i=1}^n \frac{N_n}{A_g + (A_{f_n})_n} \sin a_n x$$

式中 $(A_{f_n})_n$ ——桥面板有效宽度之和。

该方法不考虑钢桥面板的弯曲及对桥梁抗扭转、抗翘曲的作用,不能用于桥梁带悬臂板的分析,钢桥面板有效宽度的取值也不明确,有较大局限性。

b. 林国雄方法

1978 年,铁道部大桥局总工程师林国雄教授提出的板桁组合钢梁的实用计算方法,该方法将板桁组合结构共同受力分成三个系统,包括(a)作为主桁结构部分的轴向应力和弯曲应力;(b)由桥面板、纵肋、横肋构成的正交异性板的弯曲应力;(c)直接承受活载的桥面板的弯曲应力。先分别计算各系统的应力,然后叠加。

第一系统的应力按艾雷应力函数计算。积分平面问题相容方程,得出钢桥面与弦杆的应力函数:

$$\psi(x, y) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{A_n}{a_n^2} (e^{-a_n y} + B_n e^{a_n y} + C_n a_n y e^{-a_n y} + D_n a_n y e^{a_n y}) \sin a_n x$$

假定钢桥面板边界条件,积分出常数 B_n 、 C_n 、 D_n ,然后将组合截面的轴力展开成下面富氏级数,并求积分得出常数 A_n :

$$N(x) = \sum_{n=1}^{\infty} N_n \sin a_n x$$

其中

$$N_n = \frac{2}{L_x} \int_0^{L_x} N(x) \sin a_n x dx$$

最后再由应力函数求得钢桥面板的应力。此法对上述日本学者的方法作了本质的改进,能适用于带有悬臂的桥面板的应力分析,也能够考虑桥面板的剪力滞后现象,但不能考虑桥面板的局部屈曲与弯曲作用。

c. 有限元法

1981 年,西南交通大学李富文教授、徐文焕教授采用有限元法对钢板桁架组合桥梁进行了空间分析。计算中假定桁架各杆件相互刚接,每一节点有 6 个自由度,每根杆件按一空间梁元处理。为了减少自由度,又将每节间的板元和横肋梁元视为一个子结构,称为“板、杆混合单元”。整个结构由空间梁元和混合梁元两种单元组合。用此方法计算在竖向对称荷载作用下板桁结构竖向位移和应力与模型试验值良好接近,二者相差为 4.9%~10%。而在竖向偏载下的横向水平位移的计算值相差为模型试验的 1/6~1/10,此法用了正交异性板概念,不能用来分析钢板组合结构桥梁的极限承载力。另外,钢桥面板中的横肋按空间梁单元处理,横肋与矩形板单元的某些节点位移很难协调,自由度太多,计算成本高。

d. 有限条带法

1999 年,王荣辉等人为减少自由度,便于计算,则利用三角级数作为面外位移模式分析屈曲平板大变形的思想,将板桁组合结构的桥面板离散为有限横向条带的板段单元,即将板段划分为有限个单位宽横向条带,用条带竖向位移来考虑桥面板的局部屈曲,而将板桁组合结构的桁架部分用杆单元离散,达到大幅减少结构自由度的目的,又考虑桥面板局部屈曲的影响。在王荣辉等人的研究中还板桁组合结构进行了线性与非线性分析,考虑了钢梁面板局部屈曲与板桁组合结构整体屈曲的相互作用,钢梁面板的剪力滞后,板桁组合桥梁横截面的畸变与翘曲等因素的影响,非线性因素考虑了结构几何与材料非线性。

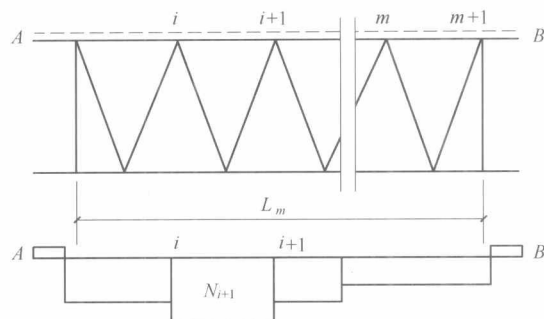


图 1-1-7 上弦杆轴力分布