

204

高速铁路钢-混叠合连续梁桥 建造技术

曹保利 赵勇 主编



同济大学出版社
TONGJI UNIVERSITY PRESS

编 委 会

主 任 曹保利 赵 勇

副 主 任 于忠波 戴润军 冀光华

编 委 李玉军 王志春 何占江 彭瑞臣

石雪飞 郑文龙 杨钦峰 肖茂良

刘宗孝 胡建鑫 郭 彬 库红艳

李光峰 王少波 李鸿博 杨宇轩

前言

钢-混凝土叠合梁桥作为现代桥梁结构形式的一个重要分支,近年来,因其工业化程度较高、质量可控、性能较优、建造过程较环保等优势而逐渐被广泛应用于我国的桥梁工程中。但是,由于工程实践经验不足,以及负弯矩区混凝土桥面板开裂等问题尚未解决,钢-混凝土叠合梁桥在我国高速铁路建造中的应用仍主要局限于中、小跨径桥梁。

新建商合杭铁路站前五标古城特大桥针对钢-混凝土叠合梁桥负弯矩区混凝土桥面板的开裂问题,提出了通过预顶升施工为负弯矩区混凝土桥面板施加预压应力的方法。新的方法为工程的建造提出了新的要求。因此,本书通过开展专项研究,系统探讨了基于预顶升施工方法的高速铁路钢-混凝土叠合梁桥在设计、构件制造、施工、施工监控、风险评估等方面的关键技术问题,并结合近年来的一些相关研究成果与建造经验,对这些技术问题进行了进一步总结。

本书的基本体系如下:

第1章主要介绍了组合结构桥梁及钢-混凝土叠合梁桥的发展、研究与应用现状,提出了叠合梁桥建造过程中的关键问题,并总体介绍了古城特大桥的工程特点。

第2章主要分析了基于预顶升施工的钢-混凝土叠合梁桥的受力特性,同时探讨了混凝土桥面板的收缩徐变、构件的制造误差等对结构整体受力特性的影响。

第3章主要对钢-混凝土叠合梁桥预顶升施工的方案进行了探究、比较与优化,并介绍了钢-混凝土叠合梁桥的制造加工、安装与顶升工艺和工法。

第4章主要介绍了高速铁路钢-混凝土叠合梁桥环氧树脂砂浆及其薄层摊铺施工工艺。

第5章主要介绍了高速铁路钢-混叠合梁桥在预顶升施工过程中的施工监测与控制相关技术。

第6章主要阐述了钢-混叠合梁桥预顶升施工过程中的风险评估方法、风险分析及风险控制技术。

钢-混叠合梁桥的建造与施工技术已成为我国桥梁工程学科中的一个重要领域。限于作者的精力与水平,本书中难免存在不当之处,谨请各位读者批评指正。



2019年10月

目 录

前言

1 绪论	001
1.1 钢-混凝土组合结构桥梁的发展现状概述	001
1.2 钢-混叠合梁桥的发展现状概述	003
1.3 钢-混叠合梁桥的关键问题	007
1.4 工程实例概述	009
2 基于预顶升施工的钢-混叠合梁桥受力特性分析	012
2.1 预顶升施工过程钢-混叠合梁受力性能研究	013
2.2 成桥后混凝土桥面板收缩徐变对叠合梁桥的影响性分析	019
2.3 钢-混叠合梁桥受力对制造误差的敏感性分析	021
2.4 本章小结	032
3 钢-混叠合梁桥预顶升施工关键技术	034
3.1 钢主梁的加工	034
3.2 混凝土桥面板的预制	050
3.3 预顶升施工对结构受力影响参数化分析	051
3.4 顶升回落方案的比较与优化	067
3.5 钢-混叠合梁的安装与顶升工艺	076
3.6 本章小结	095

4	高速铁路钢-混凝土叠合梁桥薄层环氧树脂砂浆施工工艺研究	096
4.1	环氧树脂砂浆的选型与配合比研究	096
4.2	环氧树脂砂浆薄层摊铺施工设备研究	103
4.3	环氧树脂砂浆薄层摊铺施工工艺研究	106
4.4	本章小结	109
5	高速铁路钢-混凝土叠合梁桥预顶升过程监测与控制	111
5.1	概述	111
5.2	施工监控方法研究	112
5.3	实时监测与分析	115
5.4	施工过程监测数据分析与控制	121
5.5	本章小结	129
6	钢-混凝土叠合梁桥预顶升施工风险控制技术	130
6.1	风险评估方法	130
6.2	施工风险分析与控制	134
6.3	本章小结	143
	参考文献	145

1 绪论

1.1 钢-混凝土组合结构桥梁的发展现状概述

钢-混凝土组合结构(以下简称“钢-混组合结构”)是指通过剪力连接件将钢板梁、钢箱梁、钢桁梁等钢结构与钢筋混凝土构件结合成组合截面共同工作的一种复合式结构,是一种在钢筋混凝土结构和钢结构的基础上发展起来的结构形式,兼具二者的优点。一方面,同钢筋混凝土结构相比,钢-混组合结构截面尺寸小,自重轻,抗震性能良好,且施工工期短、效率高;另一方面,同钢结构相比,钢-混组合结构整体刚度大,稳定性和整体性良好,抗火性能和耐久性能均有所改善。如今,钢-混组合结构桥梁已经成为桥梁结构形式的一个重要分支,常见的种类包括钢-混叠合梁桥、钢桁架-混凝土组合梁桥、钢管混凝土拱桥等。

钢-混组合结构大约诞生于 20 世纪 20 年代,其最初的形式为钢梁外包裹混凝土,目的在于提高钢结构的防火性能,但未考虑两种材料间的组合效应。1922 年,加拿大多蒙尼桥梁公司(The Dominion Bridge Company)的 H. M. MacKay, P. Ginespie 等对“外包混凝土的 T 字形钢梁”进行了试验研究,发现在钢梁和混凝土之间存在一定的黏结力,能够使混凝土与钢梁协同工作,从而首次提出了组合梁的概念。

20 世纪 40 年代初,钢-混组合结构梁开始进入发展阶段,世界各国相继针对这一结构形式开展了更全面的研究,尤其是对抗剪连接件开展了系统研究。有关连接件的研究成果促进了钢-混组合结构在各个工程领域的发展与应用,这其中包括钢-混组合结构桥梁。各国从实际工程需要出发,相继制定了有关组合结构桥梁的设计规范或规程。美国是最早制定组合桥梁设计规范的国家,美国钢结构协会(AISC)在 1936 年修订《钢结构设计、支座和安装规范》的过程中,增加了关于外包混凝土组合梁的设计、施工等相关内容的规定;1944 年,美国州际

公路协会(ASSHTO)制定的《公路桥涵设计规范》中纳入了组合结构桥梁的相关规定。在第二次世界大战结束后,德国为解决战后重建过程中钢材短缺的问题而使用了大量的组合结构,并于1954年基于实践经验制定了《桥梁组合梁标准》(DIN 1078)。苏联第一座公路组合梁桥建于1944年,在1962年的《苏联铁路、公路、城市道路桥涵设计技术规范》(CH 200—62)中专门列出了一章内容,系统介绍了“钢-混凝土组合结构”的设计和有关构造。日本建设省土木研究所于1952年开始进行组合梁的研究,并于1959年制定了《道路钢桥组合梁设计施工指南》,此后日本修建了大量的组合结构桥梁。

但是,钢-混组合结构桥梁的发展也经历了一些坎坷。20世纪60年代前建造的钢-混组合结构桥梁多受限于设计理论、施工方法等方面的不足,出现了诸如混凝土桥面板开裂、剪力键疲劳破坏等问题,一度影响了钢-混组合结构桥梁的应用。20世纪20年代,E. S. Andress首先提出了钢-混组合结构梁计算的换算截面理论,其主要思想是基于弹性理论方法,将混凝土和钢材两种不同材料组成的截面等效成为同一种均质材料组成的截面,但是这种方法没有考虑两种材料结合面处相对滑移产生的影响,从而导致理论分析结果与实际受力情况之间存在一定的差异。20世纪50年代,N. M. Newmark对这种换算截面理论进行了改进,提出了考虑两种材料结合面处相对滑移的“不完全相互作用”理论,但他在推导过程中使用了非常复杂的微分方程,不适用于实际工程的计算需要。20世纪60年代,Tharliman对极限强度理论在钢-混叠合梁中应用的可行性进行了试验研究,结果表明,当叠合梁达到极限承载力时,中和轴通常位于混凝土翼缘板内,可认为钢梁的全截面均达到了抗拉屈服强度。目前在国内外相关规范中,普遍采用了这种极限强度理论。

与其他国家相比,我国对钢-混组合结构的研究与应用起步并不算太晚。从20世纪50年代起,钢-混组合结构在我国交通、冶金、电力及煤矿等行业中都有所应用。1957年,建成的武汉长江大桥(图1-1)上层公路桥就采用了钢-混组合结构(跨径18 m),但当时未考虑钢材与混凝土之间的组合效应,而仅仅将其作为强度储备以提高结构的安全性或方便施工;1953年,交通部公路总局还编制了《钢筋混凝土板与钢梁联合梁桥》的通用图,桥梁跨径达到44 m。

1974年,钢-混凝土组合梁的理念出现在交通部颁布的《公路桥涵钢结构及木结构设计规范》中。20世纪80年代,哈尔滨建筑工程学院、郑州工学院、建筑科学研究院等高校、科研单位结合我国的实际情况对组合梁的性能进行了较为

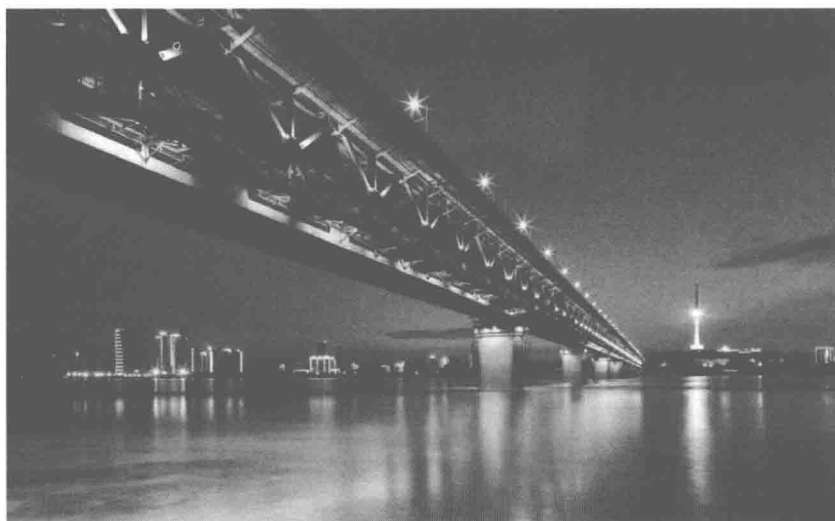


图 1-1 武汉长江大桥

系统的研究,并在此基础上重新修订和编制了《公路桥涵钢结构及木结构设计规范》(JTJ 025—1986)等规范中的相关部分,为钢-混组合结构桥梁在我国的推广应用提供了理论依据。

1.2 钢-混叠合梁桥的发展现状概述

1.2.1 钢-混叠合梁桥在公路与城市道路工程中的发展现状

近年来,随着我国桥梁工程的迅速发展,钢-混叠合梁桥在我国公路和城市道路桥梁中的应用越来越广泛。1993年,由北京市市政工程设计研究总院设计、建造的北京国贸桥,在三个主跨都采用了钢-混凝土叠合板连续梁结构,为钢-混叠合板梁在我国城市立交桥中的首次应用(图 1-2)。

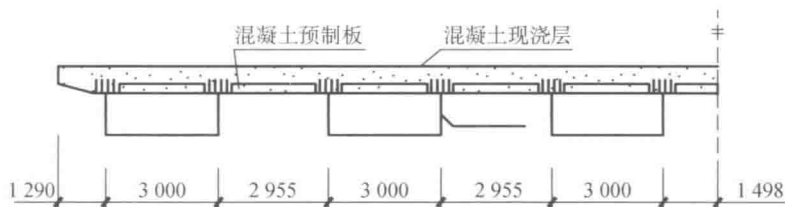


图 1-2 北京国贸桥钢-混叠合板梁桥横断面示意图(单位:mm)

1991年,建成的上海南浦大桥(图1-3),跨越黄浦江水道,主桥全长836m,主桥加劲梁采用钢-混叠合梁结构,下部为钢箱梁,上部采用混凝土预制桥面板,是上海市区第一座我国自主设计、建造的双塔双索面叠合梁斜拉桥。1993年,建成的上海杨浦大桥(图1-4),主桥全长1172m,亦为钢-混叠合梁斜拉桥,使用桥面吊机进行安装,实现了多项建造技术上的突破。



图 1-3 南浦大桥



图 1-4 杨浦大桥

2004年,长沙市建成的洪山庙大桥是当时世界上跨度最大的独塔无背索斜拉桥,其主梁采用钢-混叠合梁形式。洪山庙大桥在施工过程中,先采用多点拉杆水平千斤顶顶推法将钢主梁顶推到位,随后逐段施工斜塔柱及挂设斜拉索,然后安装桥面板(图1-5)。

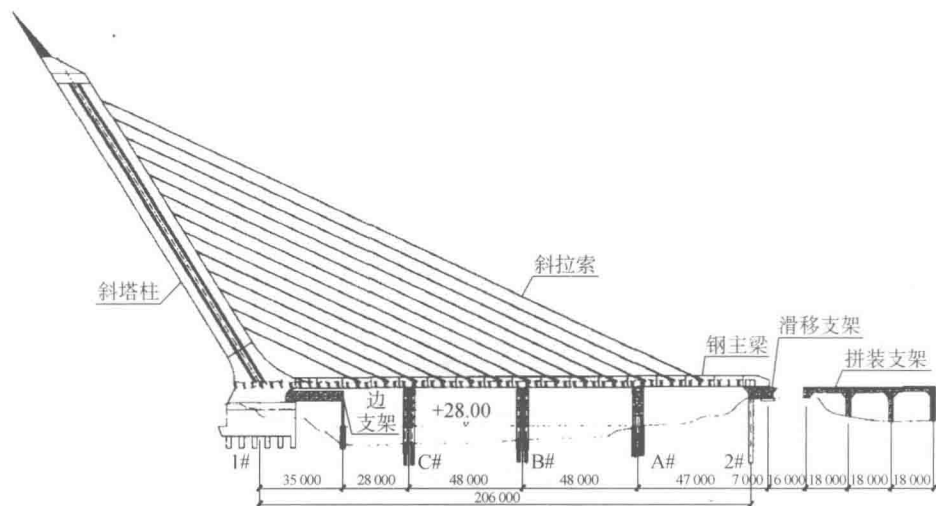


图 1-5 长沙洪山庙大桥施工总布置图(单位:mm)

2018年,港珠澳大桥正式开通运营,其浅水区非通航孔桥采用了85 m跨径的连续叠合梁桥结构形式,5~6孔为一联,全桥共11联,共计128片叠合梁,采用了整墩分幅的布置形式(图1-6)。

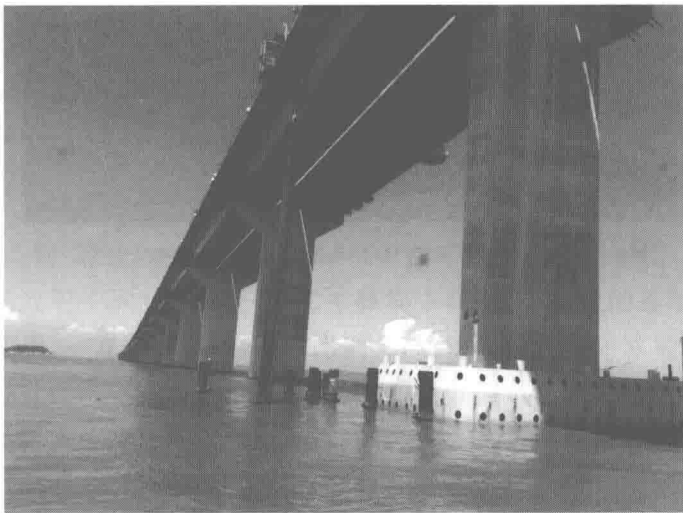


图 1-6 港珠澳大桥浅水区非通航孔桥

1.2.2 钢-混叠合梁桥在铁路工程中的发展现状

欧洲的一些国家对钢-混叠合梁桥的研究起步较早,在铁路钢-混叠合梁桥的设计、施工等方面也积累了一些经验。自20世纪80年代以来,德国先后修建了多座铁路钢-混叠合连续梁桥。如图1-7所示为德国于1993年建成的Hedemunden铁路高架桥,其钢梁部分采用了箱形断面,全长416 m,最大跨度达到96 m。在法国高速铁路建造过程中,也使用了较多的钢-混叠合梁桥,如图1-8、图1-9所示,其钢梁部分通常采用工形断面或箱形断面。

我国自20世纪80年代以来,已经有一些铁路桥采用简支钢板梁或钢箱梁形式的叠合梁桥,其最大跨度可达到48 m,采用刚性连接器及高强度螺栓作为剪力连接件。2003年建成的秦皇岛至沈阳客运专线上,采用钢-混叠合梁结构形式的桥梁共有14座,共计16联。在西安南京铁路线合肥至南京工程中,襄滁河特大桥为3孔钢-混叠合连续梁桥跨越滁河,跨径布置为32 m+40 m+32 m。

钢梁采用双箱单室断面如图1-10所示。

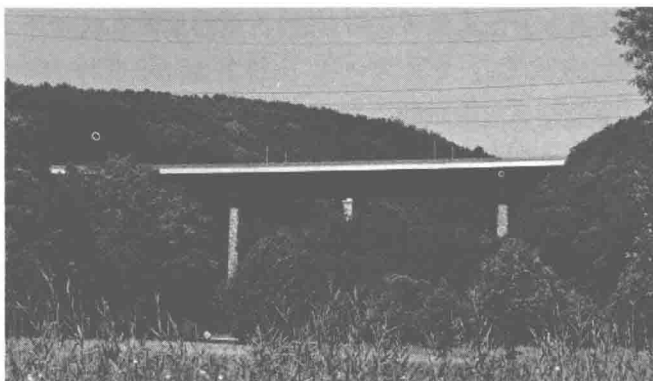


图 1-7 德国 Hedemunden 铁路高架桥



图 1-8 法国 TGV 东欧线 A31 铁路桥



图 1-9 法国 TGV 地中海线 Bonpas 铁路桥

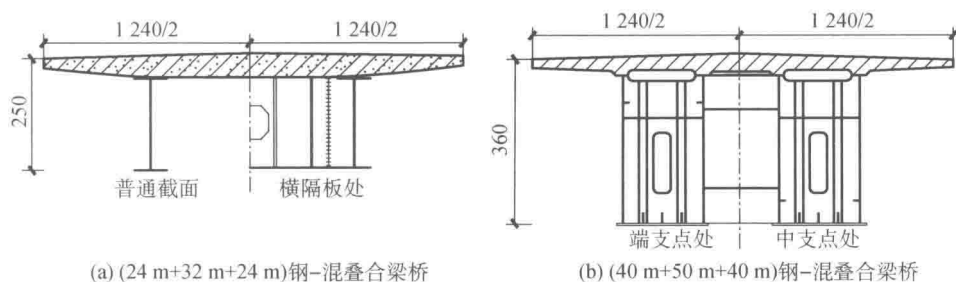


图 1-10 秦沈客运专线钢-混凝土叠合梁桥断面示意图(单位:cm)

但是,与钢-混凝土叠合梁桥在公路、城市道路工程中的应用相比,其在我国铁路工程中的应用并不十分广泛,形式主要集中在中、小跨径的连续梁桥中,其主要原因在于,一方面,铁路的重载比例大,对桥梁的性能要求较高,钢-混凝土叠合梁桥的设计技术与施工经验有所欠缺;另一方面,钢-混凝土叠合梁桥本身负弯矩区混凝土桥面板的开裂问题未能得到有效解决,桥梁的耐久性不能得到很好的保障。因此,在铁路工程中,钢-混凝土叠合梁桥的相关建造技术仍有待进一步研究与发展。

1.3 钢-混凝土叠合梁桥的关键问题

目前,在钢-混凝土叠合梁桥建造过程中,关键问题主要在于以下几个方面。

1. 剪力连接件设计

保证钢主梁与混凝土桥面板之间连接件安全、有效,这是钢-混凝土叠合梁桥发挥其性能优势的前提。然而,在复杂应力状态下,钢主梁与混凝土桥面板之间是否存在相对滑移,且相对滑移是否会对结构的受力安全性产生影响等问题是较难验证的。目前,钢-混凝土叠合梁设计与计算理论多是建立在剪力连接件可靠的基础上。我国现行《公路组合桥梁设计与施工规范》(JTG/T D64-01—2015)是通过组合梁换算截面的刚度进行折减,并对剪力连接件的构造与计算进行详细规定等方法计入相对滑移的影响。

2. 负弯矩区设计

钢-混凝土叠合梁的优点之一就是能够充分发挥钢材的抗拉性能和混凝土的抗压性能,避免了钢构件受压易屈曲、混凝土受拉易开裂的问题。但是在负弯矩

区,则会出现下部钢主梁受压、上部混凝土桥面板受拉的情况,容易导致钢梁的局部失稳和混凝土桥面板的开裂。

钢主梁的局部屈曲失稳问题可通过适当增加加劲肋的数量、板件厚度解决。针对负弯矩区混凝土桥面板的开裂问题,目前常见的解决方法有桥面板之后钢梁结合、施加桥面板预应力、采用预顶升施工(支座移位法)等。

3. 横向稳定设计

对于梁式桥来说,整个桥梁结构可能会面临倾覆问题。在外界荷载的作用下,整个桥梁结构一旦达到翻转的临界状态,梁式桥结构就会变成机动体系,可能会绕着一个轴发生翻转,从而导致整体倾覆破坏。对于钢-混凝土叠合梁桥来说,由于结构自重较小,其倾覆问题更加严重,如2012年8月24日,哈尔滨阳明滩大桥引桥因车辆超载而发生了倾覆垮塌事故,其结构形式为独柱墩的钢-混凝土叠合梁桥(图1-11)。



图 1-11 哈尔滨阳明滩大桥引桥发生倾覆垮塌事故现场

在钢-混凝土叠合梁桥的设计中,必须妥善考虑采用直线或大曲率的独柱墩梁桥形式,对有必要采用的独柱墩梁桥结构应考虑适当增加支座的横向间距,或直接进行固结处理。同时,对于抗倾覆力矩较小的钢-混凝土叠合梁桥,可采用抗拉支座或设置竖向抗拉钢筋,提高其抗倾覆的安全储备。

4. 工程实践不足,存在施工质量与安全控制风险

现阶段,我国铁路工程中钢-混凝土叠合梁桥的工程实践不足,因而对于如何建

造符合铁路运输需求的钢-混叠合梁桥缺少足够的工程经验。铁路运输的载重量普遍较大,铁路桥梁的性能需求也更高,这对铁路桥梁的工程质量与风险控制提出了更高的要求。例如,对采用预顶升施工解决负弯矩区混凝土桥面板开裂问题的钢-混叠合梁桥来说,往往需要大量程的顶升以使桥面板能够储备足够的预压应力。大量程顶升施工的同时伴随着更大的施工安全风险,由此需要更加完善的施工质量与安全风险控制措施。

1.4 工程实例概述

新建商合杭铁路站前五标古城特大桥在 DK145 + 597.75 ~ DK145 + 851.45 段设计上采用 5×50 m 上承式无砟轨道无预应力体系钢-混连续叠合梁跨越茨谷河,路线与茨谷河夹角 154° 。连续叠合梁采用“钢箱梁+环氧树脂中间介质层+混凝土桥面板”组合结构(图 1-12)。

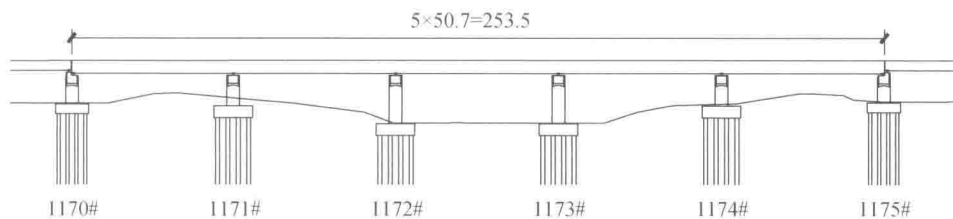


图 1-12 古城特大桥桥位布置图(单位:m)

古城特大桥钢梁部分采用桥梁专用钢材。钢梁所用钢板在钢厂内定制生产,钢板进场后根据钢板材质与厚度进行了焊接工艺试验,试验完成后组织召开了由专家及焊接人员等参加的焊接工艺评定会,根据焊接试验结果制定了焊接工艺方法,为钢梁的焊接提供了可靠的技术保障。钢梁加工完成、试拼合格后运至施工现场,进行吊装、焊接(图 1-13)。

古城特大桥混凝土桥面板分为预制桥面板与现浇桥面板两类。预制桥面板与钢梁之间通过环氧树脂砂浆黏结,该施工方法及工艺是国内在时速 350 km/h 的高速铁路建设中首次应用。环氧树脂砂浆薄层厚度为 15 mm,单块环氧树脂砂浆的施工面积为 $3.5 \text{ m} \times 7.0 \text{ m}$ 。

针对钢-混叠合梁桥负弯矩区混凝土桥面板的开裂问题,古城特大桥提出了预顶升施工的方法,混凝土桥面板设计为无预应力体系,通过在施工过程中

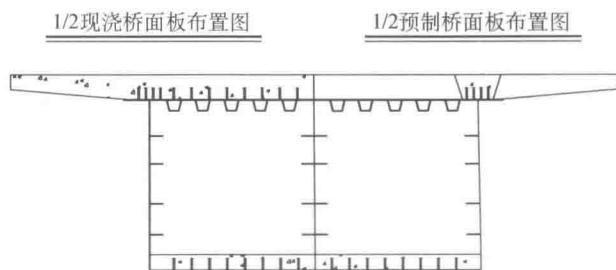


图 1-13 古城特大桥断面示意图

将钢梁顶升与回落,利用钢梁的变形对混凝土桥面板施加预压应力。在桥面板施工前,将次中墩处钢梁顶升 20 cm、中墩处钢梁顶升 70 cm,边墩处钢梁高度保持不变。此时,为了避免钢梁底部脱空,在边墩和次中墩的钢梁下设置了精轧螺纹钢锁紧装置,将钢梁拉住、锁紧。在中跨顶板及边跨底板部分混凝土施工完成后,中墩处钢梁下降 70 cm,次中墩处钢梁高度保持不变;继续完成次中墩处混凝土施工,次中墩处钢梁下降 20 cm,最后完成剩余混凝土工程。

因此,古城特大桥建造过程中面临着以下几个关键技术问题:

1. 预顶升钢-混叠合梁桥的受力特性

为了保证预顶升钢-混叠合梁桥施工过程的顺利进行,必须明确预顶升施工过程中钢-混叠合梁结构的受力特性,把握薄弱的受力环节,为施工工艺与施工监控工作的开展提供坚实的理论支撑。

2. 预顶升钢-混叠合梁桥的构件加工、安装与顶升施工

古城特大桥部分构件位于竖曲线上,对构件的制造精度要求较高,构件制造误差对预顶升施工关键环节的影响有待于进一步探究;各孔跨影响复杂,需形成完善的顶升施工工艺。

3. 薄层环氧树脂砂浆施工工艺

预制桥面板安装过程中,环氧树脂砂浆的选型与配合比,以及大面积的薄层环氧树脂砂浆摊铺施工,尚缺少可以借鉴的工程实践,需形成专项施工技术。

4. 预顶升过程的施工监测与控制

钢主梁顶升、回落与混凝土桥面板施工交替进行,工艺复杂,预顶升施工过程是否可控、是否能够实现预计的效果以及是否会对结构线形产生不利的影响等问题,都需要全面配套的施工监测控制措施。

5. 预顶升施工过程的风险评估与控制

在预顶升施工过程中,结构的内力与变形均存在大幅度的变化,施工风险较高,必须从安全管控层面出发,明确施工主要风险,提出相应的控制方法与对策,保障施工过程的安全进行。