

特大跨连续刚构桥研究与实践

— 重庆长江大桥复线桥

唐建华 向中富 冯 强 等 编著
代 彤 李 斌



人民交通出版社
China Communications Press

Tedakua Lianxu Ganggouqiao Yanjiu yu Shijian

特大跨连续刚构桥研究与实践

——重庆长江大桥复线桥

唐建华 向中富 冯 强 等 编著
代 彤 李 斌

人民交通出版社

内 容 提 要

本书以重庆长江大桥复线桥为实例,介绍特大跨径连续刚构桥建造技术。该桥采用钢—混凝土混合连续刚构与连续梁组合体系,借助独特的设计理念与创新的设计、建造技术,将世界上连续刚构桥跨径由 301m 提升到 330m。本书内容包括桥型方案研究,体系与构造设计,主梁足尺节段试验研究,钢—混凝土接头试验研究,103m 钢箱梁整体运输、转向定位与吊装出水技术研究,主梁高性能混凝土应用研究,钢—混凝土接头安装以及 103m 钢箱吊装合龙施工技术,桥梁施工过程控制技术等。该桥的建设实践经验值得国内外桥梁工作者借鉴参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

特大跨连续刚构桥研究与实践——重庆长江大桥复线桥/
唐建华等编著. —北京:人民交通出版社, 2008. 6
ISBN 978 - 7 - 114 - 07244 - 4

I. 特… II. 唐… III. 长跨桥: 刚构桥 - 桥梁工程 - 研
究 IV. U448. 23

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 089508 号

书 名: 特大跨连续刚构桥研究与实践——重庆长江大桥复线桥

著 者: 唐建华 向中富 冯 强 代 彤 李 斌 等

责任编辑: 周高檐

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: 廊坊市长虹印刷有限公司

开 本: 787×960 1/16

印 张: 16.75

字 数: 285 千

版 次: 2008 年 7 月 第 1 版

印 次: 2008 年 7 月 第 1 次印刷

书 号: ISBN 978 - 7 - 114 - 07244 - 4

印 数: 0001 ~ 2000 册

定 价: 40.00 元

(如有印刷、装订质量问题的图书由本社负责调换)

序

一个工程师对世界纪录的正确态度,应该是“不追求,也不惧怕”,脚踏实地地把工程做好!盲目地追求世界纪录是浪费国家的资源;惧怕世界纪录而放弃一个合理的设计是推诿工程师应负的责任。

重庆长江大桥复线桥的设计与建造,是一个很成功的例子。330m的主跨,是一个世界纪录。比当时世界上最大跨度的梁桥,挪威的301m主跨的Stolmasundet大桥还长大约10%。这样一个跨度,无论对钢桥或者混凝土桥都是一个很大的挑战:钢梁的上下缘板会很厚;混凝土梁会很重,导致很高的造价。设计团队接受了这个挑战,发展了钢与混凝土组合梁式大桥的创新理念,同时应用钢箱梁整体吊装的工法,成功地以合理的造价建造了一座与当地环境最适合的大桥。这是值得祝贺的事情。

在这座大桥完成之后,我们可以很清楚地体会到,当时采用梁式桥的要求是正确的。如果这座复线桥不是一座梁式大桥,不论它是斜拉桥、悬索桥亦或拱桥,都不能与原来的大桥协调,都会大大地破坏重庆山城秀丽的景色。

当然,要实现这一创新的设计理念,除设计外,必须同时在施工、监理、重点试验等各方面都有一定的突破,才能确保大桥的成功。现在,大家把这些成功的经验合编成书,当会是很有价值的读物,值得推荐!

国际著名桥梁工程专家、美国工程院院士、
中国工程院外籍院士:

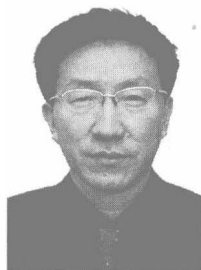
邓文忠

2008. 6

作者简介



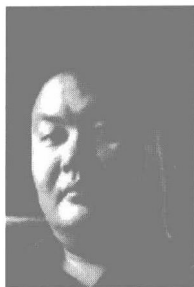
唐建华:重庆长江大桥复线桥 BT 项目经理,一级建造师、高级工程师,中国市政工程协会副会长,重庆市政工程协会理事长,《重庆市政》杂志主编。负责过多个大型市政工程建设管理、施工管理。重庆市市政企业优秀企业家。重庆城建控股(集团)有限责任公司董事长、总经理。



向中富:重庆交通大学教授,中国公路学会桥梁与结构分会理事,《桥梁》杂志编委,长期从事桥梁设计理论、桥梁施工及控制技术、桥梁加固与改造等教学、科研及技术服务,主编、参编《桥梁施工控制技术》等专著、教材、手册 9 部,发表论文 30 余篇,获省部级科技奖励 5 项。



冯强:重庆长江大桥复线桥 BT 总承包项目副总工程师,大桥主跨钢箱梁转向、定位、吊装出水及合龙工作组组长,一级建造师、注册监理工程师、高级工程师、工程项目管理硕士,国家“十五”科技攻关成果奖获得者,担任多个大型市政工程项目经理、总监。



代彤,1991年毕业于长沙铁道学院铁道工程专业,学士学位,2003年获重庆大学工程硕士学位,林同棧国际(重庆)工程咨询公司高级工程师,曾获建设部优秀勘察设计三等奖,重庆市建设委员会勘察设计“四优”一等奖,重庆市优秀勘察设计一等奖,发表桥梁论文多篇。



李斌:1990年毕业于重庆交通学院,工学学士。重庆桥梁工程总公司总工程师,高级工程师,参与主持了重庆李家沱长江大桥、广东金马大桥、重庆鹅公岩长江大桥、重庆大佛寺长江大桥等工程施工,获中国公路学会科学技术三等奖,发表学术论文10余篇。

前 言

本书以重庆长江大桥复线桥为工程实例,介绍了特大跨径钢—混凝土混合连续刚构与连续梁组合体系梁桥设计、施工、科研等方面的关键技术问题。

重庆长江大桥于1980年建成通车,是重庆主城区南北大通道的关键工程。重庆长江大桥结构形式为8跨带挂孔的预应力混凝土T型刚构,跨径组合为 $86.5\text{m}+4\times 138\text{m}+156\text{m}+174\text{m}+104.5\text{m}$,4车道。其中,主跨174m,至今仍为世界同类之冠。随着交通量的迅猛增长,重庆长江大桥已不能满足需要,在本桥位增加车道刻不容缓。经过研究,决定建设重庆长江大桥复线桥。

为使重庆长江大桥复线桥桥面高程与既有桥梁一致,桥梁外形与既有桥梁协调,通航条件满足现行规范与长江通航要求等设计原则,桥梁布置为 $86.5\text{m}+3\times 138\text{m}$ (连续梁)+ $138\text{m}+330\text{m}+104.5\text{m}$ (连续刚构)。

为建设世界跨径最大、结构新颖独特、施工难度极高的重庆长江大桥复线桥,必须解决相关技术难题,给桥梁设计、施工质量与安全控制提供技术支撑。因此,项目业主——重庆市城市建设投资公司组织,重庆长江大桥复线桥建设BT[重庆城建控股(集团)有限责任公司—林同棧国际(重庆)工程咨询有限公司联合体]项目部具体实施,重庆城建控股(集团)有限责任公司、林同棧国际(重庆)工程咨询有限公司、重庆交通大学、重庆交通科研设计院、重庆桥梁工程总公司、武昌造船厂等单位负责,就重庆长江大桥复线桥桥型方案,结构体系与构造设计,主梁节段模型试验,钢—混凝土接头模型试验,103m钢箱梁整体运输、转向定位及吊装出水,主梁高性能混凝土应用,钢—混凝土接头安装以及103m钢箱吊装合龙施工技术,桥梁施工过程控制技术等开展深入研究。

在设计上,重庆长江大桥复线桥将既有桥梁 $156\text{m}+174\text{m}$ 通航孔合为330m,一举解决了通航净空问题,也使其跨径达到世界梁式桥之最(之前世界最大跨径为1998年建成的挪威Stolma-sundet大桥,主跨301m,国内为1997年建成的广东虎门大桥辅航道桥,主跨270m);为解决预应力大跨连续刚构因恒载应力过高而难以提高跨越能力的难题,在330m主跨中间创造性地采用108m钢箱梁,有效地解决了混凝土梁自重过大的问题;连续刚构与连续梁组合桥梁连续跨数7跨,连续长度1103.5m,主梁最大梁高16m,连续跨数、连续长度和梁高均

较少见;在梁桥上首次采用钢—混凝土接头,该接头位于正、负弯矩交替作用区,通过巧妙地设计使在较短的距离内实现了钢箱梁到混凝土梁力的平顺传递;钢—混凝土组合连续刚构有效地改善了因混凝土收缩徐变对大跨结构后期线形变化的不良影响;330m主跨首次在设计时采用可调、可换的体外索体系作为结构措施,解决以往一些桥梁在服役期下挠过大、裂缝较多等问题;面临主结构(连续刚构)边跨(132.5m)与主跨(330m)的比例失调等诸多设计困难。

在施工方面,主梁悬臂节段浇筑重量最大达380t,挂篮自重与荷载之比为0.33,在国内领先;钢—混凝土接头为混凝土箱梁与钢箱梁之间受力的过渡区段,钢—混凝土接头在111m混凝土箱梁悬臂上动态安装,其空间几何状态精度达到国内领先水平;钢箱梁长103m、宽19m、重1400t,在国内首次实现长江上整体自浮式长距离运输,创造了长江航运的多个第一;钢箱梁旋转抬头、平行上升、再恢复水平的钢箱梁吊装出水方案,消除了平行出水引起的较大吸附力,保证了吊装系统以及吊装支撑系统—桥梁已成主体结构的安全,该方法在全国首次采用。

在施工控制中,成功地解决了不对称T梁的施工控制问题;在长达2年的时间跨度内,实现了多合龙龙口(8个)的自然合龙;实现了主跨钢—混凝土接头安装位置的精确预控;对主跨103m钢箱梁吊装前后的结构状态实现了精确预控,其钢—混凝土接头端面与103m钢箱梁端面的空间几何误差均控制在允许误差内,最终实现了103m钢箱梁的自然(免强迫措施)合龙。

在国际上首次完成的钢—混凝土接头大比例尺(1/2)模型试验、国内最大规模的混凝土主梁节段足尺模型试验等专题研究,为重庆长江大桥复线桥的安全、顺利建成提供了关键性的技术保障。

重庆长江大桥复线桥的建成为世界特大跨径连续刚构桥建设理念更新和发展进步提供了成功范例。总结该桥设计、施工、控制、科研,对促进世界连续刚构桥的建设发展与技术进步具有非常重要的意义。

本书共分九章。第一章、第二章由代彤、刘安双、马振栋、刘雪山、郭兆祺、刘国祥编写;第三章由向中富、黄海东、乔卫国、郑建安编写;第四章由郑罡、王俊如编写;第五章由王瑞燕、冯强、武朝晖编写;第六章由胡光宇、杨志刚编写;第七章由李斌、陶宏义、李勇超、朱光华、龙跃、杨寿忠、张天许、陈明华、卢勇编写;第八章由向中富、刘志辉、乔卫国编写;第九章由唐建华、冯强、丁纪兴编写。全书由唐建华、向中富、冯强、代彤、李斌主编,由向中富统稿。感谢何跃为本书编排所做的工作。

T. Y. Lin International 邓文中博士(美国工程院院士与中国工程院外籍院士)、孙峻岭博士,重庆市城市建设投资公司华渝生董事长杨忠总工程师、李华基高工,重庆江北城开发公司雷尊宇董事长、祁仁俊总工程师,重庆城建控股(集团)有限责任公司杜宇隆董事长、刘成清总工程师,林同棧国际(重庆)工程咨询有限公司杨联章总经理,重庆桥梁总公司何平总经理、罗森勇高工、陈德生高工,重庆交通大学顾安邦教授,同济大学李建中教授,西南交通大学范文理教授,英国 Dorman Long Technology Limited 的 Mike 和 Tom 先生等为本桥建设作出了贡献,并为本书编写提供了大量资料和悉心指导,在此一并表示感谢。

本书编写时间仓促,难免有谬误之处,敬请读者批评指正。

编者

2007 年 10 月

目 录

第 1 章 重庆长江大桥复线桥桥型方案研究	1
1.1 桥梁方案研究	1
1.2 方案设计	6
1.3 重庆长江大桥复线桥的特点	7
第 2 章 重庆长江大桥复线桥结构设计	9
2.1 桥梁结构设计	9
2.2 桥梁结构分析	10
2.3 平衡设计	12
2.4 成桥状况分析	17
2.5 钢—混凝土接头设计	18
2.6 体外索设计	26
2.7 合龙设计	32
第 3 章 主梁悬臂节段试验研究	39
3.1 概述	39
3.2 主梁悬臂箱梁节段足尺模型设计与试验	40
3.3 大吨位预应力混凝土锚下受力行为	49
3.4 大悬臂单箱单室预应力混凝土框架效应研究	65
3.5 大悬臂节段施工工法研究	69
第 4 章 主跨钢—混凝土接头试验研究	71
4.1 概述	71
4.2 构造与受力特点	71
4.3 疲劳荷载分析	75
4.4 大比例尺相似模型设计和制作	78
4.5 三维有限元分析	80
4.6 试验工况分析和设计	86
4.7 试验测试方案分析	93

4.8	试验结果分析与建议	97
第5章	主梁高性能混凝土应用与桥面铺装技术研究	113
5.1	基本技术要求	113
5.2	原材料选择及质量控制	115
5.3	高性能混凝土配合比设计	118
5.4	高性能混凝土在重庆长江大桥复线桥的应用	125
5.5	钢桥桥面铺装技术研究	130
第6章	钢箱梁整体浮运、转动定位和吊装出水技术研究	134
6.1	概述	134
6.2	钢箱梁整体运输及定位方案比较	135
6.3	钢箱梁整体浮运总纵强度与横强度分析	137
6.4	钢箱梁转向定位轨迹和姿态设计计算	146
6.5	钢箱梁转向定位方案箱体水动力分析与计算	151
6.6	钢箱梁转向定位方案箱体稳定性分析与计算	159
6.7	钢箱梁转向定位强度分析	162
6.8	钢箱梁吊装出水运动规律研究与计算	166
6.9	钢箱梁吊装出水水动力分析与计算	170
6.10	钢箱梁吊装出水施工流程设计	172
6.11	钢箱梁吊装出水强度分析	174
6.12	钢箱梁吊装出水模型试验研究	174
第7章	施工技术	179
7.1	混凝土箱梁施工	179
7.2	钢—混凝土接头施工技术	193
7.3	钢箱梁吊装合龙施工	200
7.4	3号至4号墩间现浇段施工	209
7.5	体外预应力施工	216
第8章	施工控制技术	219
8.1	重庆长江大桥复线桥施工控制特点	219
8.2	施工控制任务与目标	221
8.3	施工控制的理论与方法	221
8.4	施工控制实施	231

8.5 主跨钢箱梁吊装、合龙控制要点及应急预案·····	237
8.6 施工控制结果 ·····	242
第9章 建设投资与管理模式·····	244
9.1 工程建设投资模式概述 ·····	244
9.2 重庆长江大桥复线桥建设投资模式的选择 ·····	244
9.3 重庆长江大桥复线桥建设管理模式 ·····	246
9.4 重庆长江大桥复线桥建设专项技术管理 ·····	249
主要参考文献·····	252

第 1 章 重庆长江大桥复线桥桥型方案研究

重庆长江大桥于 1980 年建成通车,是重庆主城区南北大通道的关键工程。桥梁采用 8 跨带挂孔的预应力混凝土 T 型刚构桥,跨径组合为 $86.5\text{m}+4\times 138\text{m}+156\text{m}+174\text{m}+104.5\text{m}$,4 车道。其中主跨 174m,至今仍为世界同类之冠。如图 1.1 所示。

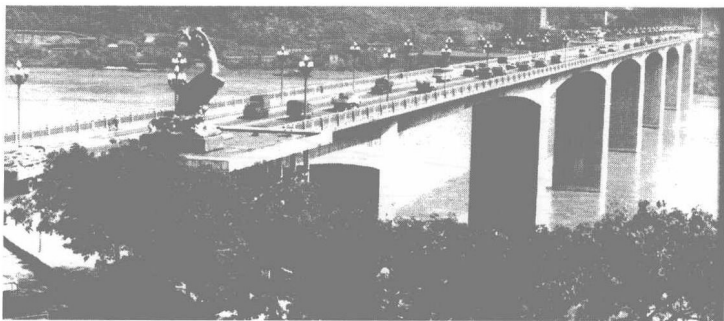


图 1.1 重庆长江大桥

随着交通量的迅猛增长,重庆长江大桥已不能满足需要,在本桥位增加车道刻不容缓。经过研究,决定建设重庆长江大桥复线桥。

1.1 桥梁方案研究

1.1.1 桥梁设计原则

桥面高程与既有桥梁一致,桥梁外形与既有桥梁协调,通航条件满足现行规范与长江通航要求。

1.1.2 关于桥型方案的思考

重庆长江大桥复线桥设计原则中,桥面高程与既有桥梁一致容易满足。要满足现行规范与长江通航对通航孔径的要求,主跨需不小于 300m,同时,又要求

桥梁外形与既有桥梁协调,这就给桥型方案设计带来非常大的困难。

对于 300m 以上跨径的桥梁,梁式桥不是首选,首选的是斜拉桥、悬索桥以及拱桥,这几种桥型均较成熟,在本工程上均有竞争力。

现代桥梁从 18 世纪后期算起已经历了 200 余年,桥梁的跨度从不足 100m,到 20 世纪末已逼近 2 000m。21 世纪的桥梁将向新型、大跨、轻质、灵敏和美观的目标发展。

由图 1.2 及图 1.3 可简单地回顾斜拉桥及悬索桥的跨径发展历史及趋势(拱桥的资料未列出)。

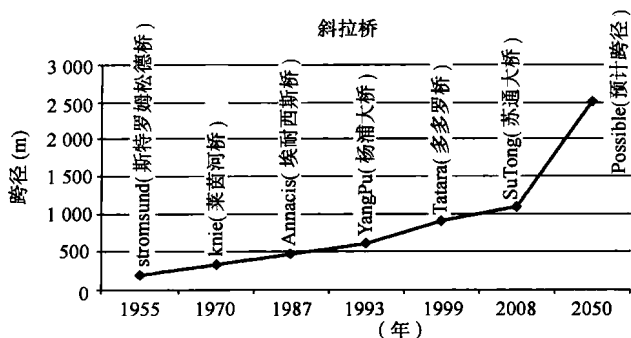


图 1.2 斜拉桥发展历史及趋势

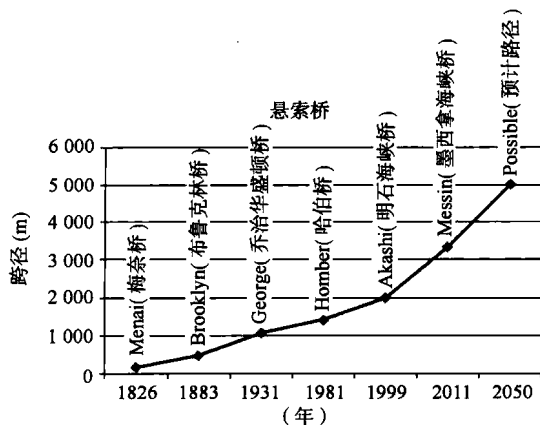


图 1.3 悬索桥发展历史及趋势

这些桥型在本桥桥位建一座 300m 以上跨径的新桥来讲均是一个较好的选择,也可以作出很多独特的方案。而现在需紧邻既有桥梁建造复线桥,必须考虑既有桥梁与新桥在景观上的匹配。

由于重庆长江大桥为预应力混凝土变截面 T 型刚构桥,在选择方案时仅能从梁桥入手。重庆长江大桥主航道由 156m+174m 两跨组成,为满足通航要求,必须取消水中墩以满足通航要求。从景观考虑,其余部分新桥与既有桥梁墩位应一一对应。因此,主航道上的新桥跨径变成了 $156\text{m}+174\text{m}=330\text{m}$ 。如此大跨径的梁桥建设是一个挑战。结构上只有两种选择:钢梁桥和预应力混凝土连续刚构桥。

首先看钢箱梁,根据表 1.1 和图 1.4,钢箱梁的发展在近 50 年里没有太大的进步,最大跨径为 300m。其原因是钢箱梁跨径从技术上是可加大,但厚钢板的制造和加工比较困难,费用也增加很快,其性价比不如混凝土桥高。如桥墩附近主梁的底板基本上是受压构件,就承压能力而言,150mm 厚的 Q345 钢板大致等同于 1 200mm 厚 C60 混凝土,而浇筑 1 200mm 厚的混凝土板要比制作 150mm 厚的钢板容易得多、经济得多。因此,在目前条件下,把重庆长江大桥复线桥建成钢桥,在经济上是不可行的,只有在混凝土连续刚构桥上考虑。

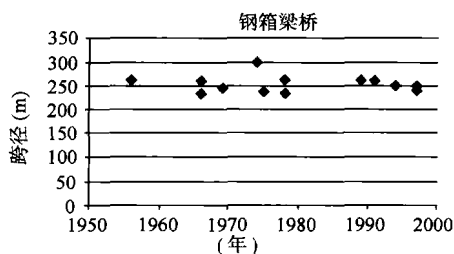


图 1.4 钢箱梁统计图

钢箱梁统计表

表 1.1

桥 名	建成年份	跨径(m)
Sava 1(萨瓦 1 号桥)	1956	261
Duchess Charlotte(都切斯查洛特大桥)	1966	234
Auckland Habor(奥克兰海港大桥)	1969	244
Rio Niteroi(尼特罗伊大桥)	1974	300
Koblenz(科普伦茨桥)	1975	236
Neckartal(内卡河谷大桥)	1978	263
Neckartal 2(内卡河谷 2 号桥)	1978	234
Ponte de Victoria(维多利亚大桥)	1989	260
Kaita(海田大桥)	1991	259
Namihaya(拉米哈亚大桥)	1994	250
Sava 2(萨瓦 2 号桥)	1997	250
Tokyo Bay(东京湾大桥)	1997	240

目前,世界上最大跨径的混凝土梁桥是主跨为 301m 的挪威斯托尔马桥。就现有的建桥实践经验而言,修建 330m 跨的混凝土梁桥将是一个巨大的跨越。

从表 1.2 及图 1.5 可以看出,混凝土梁桥的跨径在初期增长比较快,但近 20 年增长趋势就比较平缓,远不如斜拉桥和悬索桥。而国内在虎门大桥辅航道上建成了主跨 270m 连续刚构桥后,其跨径增长停滞不前,并且,已建成的部分连续刚构桥暴露出了一些质量通病,使国内对大跨径连续刚构桥的采用变得谨慎起来。目前,我国大跨径预应力混凝土梁式桥有两种主要病害:一是跨中下挠,二是梁体开裂。混凝土徐变期比预计的长得多,最终下挠值远超过设计允许值;梁体开裂的问题相对较多,主要包括斜裂缝、横向裂缝、纵向裂缝、预应力齿板裂缝等。

混凝土连续刚构桥统计表

表 1.2

桥 名	建成年份	跨径(m)
Balduinstein(巴尔杜因施泰因桥)	1951	62
Worms(沃尔姆斯桥)	1953	114
Bendorf(本道夫桥)	1965	208
Koror(科罗尔)	1976	241
Gateway(盖特威桥)	1986	260
Humen(虎门大桥辅航道桥)	1996	270
Raftsundet(拉脱圣德桥)	1998	298
Stolmasundet(斯托尔摩圣德桥)	1998	301

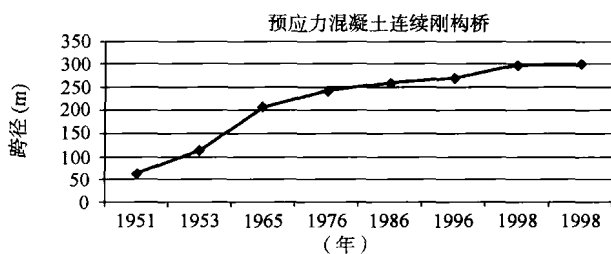


图 1.5 混凝土连续刚构统计表

大跨径混凝土桥梁还有一个很大的弊病是自重过大。比如虎门大桥辅航道连续刚构桥,自重占总效应的 92%,挪威斯托尔马桥自重占总效应的 93%,因此,如何有效地降低自重是提高混凝土梁桥跨径的关键。挪威所修建的大跨径梁桥均是由普通混凝土与轻质混凝土组成的复合混凝土结构,而其中轻质混凝土的集料都是从美国进口。重庆长江大桥复线桥也只有通过类似的方法,在主

跨跨中采用轻质混凝土的方式来减少上部结构的剪力和弯矩。林同棣国际工程咨询有限公司在轻质混凝土方面有着丰富的经验,在设计美国加利福尼亚的 Benicia 桥时,对美国大约 20 种不同的商用轻质混凝土集料进行了严格的测试。试验结果表明,只有三种能满足设计需求,大多数的集料不能满足混凝土弹性模量的要求。这也是挪威从美国远道进口轻质混凝土集料的原因。

目前,轻质混凝土在中国的应用很少,对于重庆长江大桥复线桥而言,从美国进口集料在经济上是不可行的。另一方面,在工期要求很紧的情况下,在中国进行大量、昂贵的试验以寻找合适的轻质集料也是不现实的。

此外,对于 330m 跨径而言,在主跨跨中使用轻质混凝土并不能有效降低结构自重,从而使得经济与技术上均可行。因此,决定在主跨跨中用钢梁代替轻质混凝土。

采用钢箱梁的优点可以由以下简单的计算看出。假设上部结构为等截面梁,将其分成 3 等份,每份长 110m,跨中部分的自重集度为 P_1 ,其余部分的集度为 P_2 ,如图 1.6 所示。主梁根部的负弯矩为 $4\,369P_1 + 4\,706P_2$,而钢箱梁的重量大约相当等效混凝土梁自重的 30%,即 $P_1 = 0.3P_2$,梁端负弯矩将会减小大约 1/3,对如此大跨径桥梁而言,降低 1/3 的根部弯矩是非常有利的。

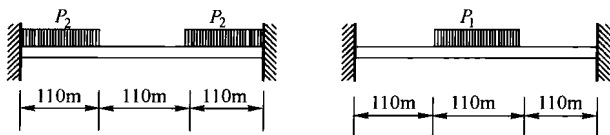


图 1.6 组合上部结构理念

换言之,在主跨中部采用钢箱后,330m 跨径梁桥根部弯矩大约相当于 270m 全混凝土梁桥的根部弯矩。很明显,270m 跨的混凝土梁桥在目前的技术水平条件下是合适的。

基于上述理由,跨中钢梁越长,梁端根部负弯矩越小。但是钢箱梁的造价远高于混凝土梁,如果再考虑到钢梁的造价,从理论上可以估算出钢箱梁节段的最合理长度。

确定钢梁长度的另一个因素是施工条件。钢箱梁在工厂制造完成后,通过水运整体运至桥位处,整体提升至桥面,这也对箱梁的长度带来一定限制。经过反复的论证,确定中跨钢梁长度为 103m(如图 1.7),加上两端的钢—混凝土结合段,整个跨中钢梁长 108m,重 1 400t。

采用上述结构后,使得主跨自重只占总效应的 89%,其有效效应大大提高,也将梁式桥跨径向前大大推进了一步。图 1.8 示出了连续刚构发展情况。