

Key Technology and Application of
One-closure Scheme for
Multi-span Continuous Rigid Frame Bridge

连续刚构桥多跨一次合龙 关键技术及应用

林新元 王学礼 张峰 王新伟◎编著



人民交通出版社股份有限公司
China Communications Press Co., Ltd.

连续刚构桥多跨一次合龙 关键技术及应用

Key Technology and Application of One - closure Scheme for
Multi - span Continuous Rigid Frame Bridge

林新元 王学礼 张峰 王新伟 编著



人民交通出版社股份有限公司
China Communications Press Co., Ltd.

内 容 提 要

本书研究了连续刚构桥不同跨数、不同合龙顺序对主梁线形、应力及桥墩墩顶位移和内力的影响,系统温差在不同合龙顺序时对主梁应力、线形及桥墩受力的影响,不同合龙顺序下主梁及桥墩在混凝土收缩、徐变作用下的长期结构行为;通过理论基础研究,证明了多跨一次合龙技术的可行性;介绍了多跨一次合龙的施工技术,以及合龙段的施工工艺、配重、合龙温度及顶推工艺;基于铜黄高速公路项目,介绍了多跨一次合龙技术在几座特大跨连续刚构桥中的应用。

本书可供从事桥梁施工、科研的技术人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

连续刚构桥多跨一次合龙关键技术及应用/林新元等编著. —北京:人民交通出版社股份有限公司, 2014.5

ISBN 978-7-114-11408-3

I. ①连… II. ①林… III. ①连续刚构桥—合龙
IV. ①U448.23

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 088845 号

书 名:连续刚构桥多跨一次合龙关键技术及应用

著 作 者:林新元 王学礼 张峰 王新伟

责任编辑:王文华(125976580@qq.com)

出版发行:人民交通出版社股份有限公司

地 址:(100011)北京市朝阳区安定门外外馆斜街3号

网 址:<http://www.ccpress.com.cn>

销售电话:(010)59757973

总 经 销:人民交通出版社股份有限公司发行部

经 销:各地新华书店

印 刷:北京市密东印刷有限公司

开 本:720×960 1/16

印 张:9.5

字 数:160千

版 次:2014年5月 第1版

印 次:2014年5月 第1次印刷

书 号:ISBN 978-7-114-11408-3

定 价:30.00

(有印刷、装订质量问题的图书由本公司负责调换)



前言

大跨连续刚构桥梁结构的分段施工一般要经历一个长期复杂的施工阶段。按照传统的合龙工艺,多跨连续刚构桥的合龙需经过几次结构体系的转换,随着施工阶段的推进,桥梁的结构形式和荷载作用方式等都在不断发生变化。结构中的最终恒载内力与施工合龙的程序有关,不同的施工程序,由于它们的初始恒载内力不同,在体系转换的过程中,由徐变引起的内力重分布的数值也不同。采用不同的合龙顺序对整个桥梁建设的工期和成本的影响也不同,因此,选择正确的合龙顺序至关重要。

目前,连续刚构桥比较成熟的施工技术一般按“对称悬臂浇筑→边跨合龙→中跨合龙”的顺序施工,由于大跨径连续刚构桥跨径大、连续孔数多、超静定次数高,其成桥需经历一个长期而复杂的结构体系转换过程,而且对于多跨布置的连续刚构桥梁,这种成桥顺序需要的工期长,施工成本大。

多跨一次合龙,可缩短整个合龙工程的工期,工序紧凑。此外,多跨连续体系一次合龙,使合龙段的荷载同时作用在最终结构上,可使内力的变化更趋均匀,比逐孔合龙相继产生的次内力随超静定次数的增加,其作用的结构形式不断改变所带来的复杂内力计算要简单得多。因此,采用多跨连续体系一次合龙可以达到线形正确、受力合理、成桥快的目的。

全书共分两大部分进行阐述。

第一部分重点研究了不同跨数、不同合龙顺序对主梁线形、应力及桥墩墩顶位移和内力的影响;系统温差在不同合龙顺序时对主梁应力、线形及桥墩受力的影响;不同合龙顺序下的主梁及桥墩在混凝土收缩、徐变作用下的长期结构行为。通过理论基础研究,证明了多跨一次合龙技术的可行性。

第二部分重点介绍了多跨一次合龙的施工技术;研究了合龙段的施工工艺、配重、合龙温度及顶推工艺;同时基于铜黄高速公路项目,介绍了多跨一次合龙技术在几座特大跨连续刚构桥中的应用。

限于著者的知识视野和学术水平,书中难免存在不当之处,恳请读者批评指正。如有问题,请联系山东大学桥梁所副教授张峰(zhangfeng2008@sdu.edu.cn)。

作者

2014 年 4 月



目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 连续刚构桥的受力特点	1
1.2 连续刚构桥发展概况	2
1.3 连续刚构桥分段施工及合龙的重要性	5
1.4 大跨径连续刚构桥合龙研究概况	7
1.5 一次合龙技术的提出	9
第 2 章 一次合龙的可行性研究	11
2.1 混凝土收缩、徐变的基本概念	11
2.1.1 混凝土收缩机理	12
2.1.2 混凝土徐变的基本概念	13
2.1.3 混凝土徐变机理	14
2.1.4 影响因素分析	18
2.1.5 徐变对桥梁结构的影响	22
2.2 不同收缩、徐变计算模型	22
2.3 不同跨数、不同合龙顺序对结构内力、线形的影响分析	25
2.3.1 不同跨数、不同合龙顺序对主梁应力的影响	28
2.3.2 不同跨数、不同合龙顺序对主梁线形的影响	34
2.3.3 不同跨数、不同合龙顺序对桥墩墩顶位移和内力的影响	39
2.3.4 小结	41
2.4 不同合龙顺序结构系统温差效应分析	41
2.4.1 系统温差在不同合龙顺序时对主梁应力的影响	42
2.4.2 系统温差在不同合龙顺序时对主梁线形的影响	49

2.4.3	系统温差在不同合龙顺序时对桥墩受力的影响	54
2.4.4	小结	56
2.5	不同合龙顺序的收缩、徐变效应研究	57
2.5.1	不同合龙顺序收缩、徐变对主梁应力的影响	59
2.5.2	不同合龙顺序收缩、徐变对主梁线形的影响	69
2.5.3	不同合龙顺序收缩、徐变对桥墩受力的影响	74
2.5.4	小结	76
2.6	本章小结	77
第3章	一次合龙的施工技术	79
3.1	合龙段施工工艺流程	79
3.2	合龙中配重的确定	80
3.2.1	配重的作用	80
3.2.2	配重的设置方法	81
3.2.3	配重大小的选择	83
3.2.4	配重的释放	84
3.3	合龙温度的影响及选择	84
3.3.1	环境温度对合龙段的影响	84
3.3.2	温度模式的选择	85
3.3.3	合龙温度的确定	85
3.4	合龙中的劲性骨架	86
3.4.1	合龙段的劲性骨架	86
3.4.2	劲性骨架的作用	87
3.4.3	劲性骨架的设置	88
3.4.4	劲性骨架最小截面的确定	89
3.5	连续刚构桥顶推合龙工艺	89
3.5.1	顶推的意义	89
3.5.2	顶推工艺的三要素	90
3.5.3	顶推力大小的计算	92
3.5.4	顶推力的优化	95
3.6	顶推施工流程	98
3.6.1	工艺流程	99

3.6.2 顶推前的准备	99
3.6.3 顶推施工控制要点	100
3.7 合龙施工注意事项	102
第4章 工程应用举例	106
4.1 沮河特大桥工程概况及施工工艺	106
4.1.1 工程概况	106
4.1.2 施工方案	106
4.2 黄家沟大桥工程概况及施工工艺	116
4.2.1 工程概况	116
4.2.2 施工方案	116
4.3 常家河特大桥工程概况及施工工艺	121
4.3.1 工程概况	121
4.3.2 施工方案	122
第5章 结论与展望	131
5.1 结论	131
5.2 展望	132
附录	133
附录1 沮河特大桥左幅5、6号墩合龙顶推数据记录表	133
附录2 黄家沟大桥左幅7、8号墩合龙顶推数据记录表	135
附录3 常家河特大桥左幅6、7号墩合龙顶推数据记录表	137
参考文献	139
索引	143

第 1 章 绪 论

建立四通八达的现代化交通网,大力发展交通运输事业,对发展国民经济,加强全国各族人民的团结,促进文化交流和巩固国防等方面,都具有非常重要的作用。在公路、铁路、城市和农村道路以及水利建设中,为了跨越各种障碍(如深沟、峡谷、河流或其他路线),必须修建各种类型的桥梁,因此桥梁是交通线路中的重要组成部分。它不仅是公路总造价中的重要部分,而且通常也是保证全线早日通车的控制性工程,建成后也往往成为当地的标志性建筑物。在国防上,桥梁是交通运输的咽喉,历来是兵家必争之地。在需要高速、机动的现代化战争中,它具有更突出的地位。

近几十年,随着科学技术的进步,桥梁建设技术得以迅速发展,并逐步建立立体交通网络。跨江大桥、现代高速公路迂回交叉的立交桥、高架桥和城市高架道路,以及更长的跨海湾、海峡大桥,城郊高速铁路桥及轻轨运输高架桥等,犹如一条条“彩虹”使天堑变通途,极大地改善了我国交通拥堵的现状,推动了国民经济的发展,方便了广大群众的生活。在各种桥型中,外表朴实、适应性强、施工方便、投资少、效益高的连续刚构桥得到了广泛的应用。在可预见的未来,国民经济的发展使我国对高等级公路需求越来越多,伴随而来的是对桥梁跨越深沟、峡谷、河流能力的要求越来越高,大跨径预应力混凝土连续刚构桥^[1-2]因其自身结构刚度大、伸缩缝少、行车舒适、养护简单等优点迅速发展起来,并适应了桥梁建设的需要,得到广泛的应用和推广。

1.1 连续刚构桥的受力特点

连续刚构桥是在连续梁桥的基础上发展起来的墩梁固结的结构体系,它综合了连续梁与 T 形刚构桥的受力特点,将主梁做成连续梁体系,与薄壁桥墩固结而成,既保持了连续梁无伸缩缝、行车平顺的特点,又保持了 T 形刚构桥不设置支座,不需要体系转换的优点,并且连续刚构桥可以通过高墩的柔度来适应结构由于预应力、混凝土收缩徐变以及温度变化等因素产生的位移,使结构受力更合理。

连续刚构桥在受力性能上有以下主要特点^[3-4]:

(1) 墩梁固结,上部结构和下部结构共同承担受力,减少了墩顶负弯矩。

(2) 结构为多次超静定体系,混凝土收缩徐变、温度变化、预应力作用,墩台不均匀沉降等引起的附加内力对结构影响较大。

(3) 采用柔性墩,能承受较大的变位。

(4) 整体性能好,抗震性能好,抗扭潜力大。

连续刚构体系保持了连续梁的各个优点,墩梁固结节省了大型支座的昂贵费用,减少了墩及其基础的工程量,改善了结构在水平方向的受力性能。

1.2 连续刚构桥发展概况

连续刚构桥同时具有连续梁桥和 T 形刚构桥的优点,即连续刚构桥在悬臂施工时不需要临时固结及转换体系的工序,在运营期还可以同连续梁桥一样无伸缩缝,保证了行车舒适。连续刚构桥在顺桥向的抗弯刚度和横向的抗扭刚度大,满足特大跨径桥梁的受力要求。其中薄壁桥墩具有一定的柔性,还可适应结构的纵向温度变形,合理选择墩柱和梁的刚度,还可以减小梁跨跨中弯矩,从而可以减小梁的建筑高度。从结构上看,连续刚构桥具有结构整体性能好,抗震能力强,抗扭能力大,桥体简洁明快,施工、维护方便的特点。预应力连续刚构桥的经济跨径一般在 80 ~ 300m,既符合桥梁设计“安全、实用、经济、美观”的基本原则,又有很强的适应性,当桥墩较矮时,这种桥型的使用受到限制^[5]。

预应力混凝土连续刚构桥最早是从国外发展起来的^[1,6],第一座大跨预应力混凝土连续刚构桥是 1964 年在原联邦德国建造的主跨为 208m 的本多夫桥,该桥采用薄壁桥墩来代替 T 形刚构的粗大桥墩,边孔做成连续体系,中孔仍采用剪力铰。这种桥型是连续刚构的雏形,它的主要受力仍延续 T 形刚构桥的受力特点。该桥既体现了悬臂施工方法的优越性,在结构形式上也有了突破,即墩梁固结,形成了带铰的连续刚构体系。此后,随着高等级公路对行车平顺舒适的需求,多伸缩缝的 T 形刚构桥已不能很好地满足要求,于是大跨径连续刚构体系得到了很大的发展,连续刚构体系在世界各地开始得到广泛应用。随着建筑材料和施工方法的进一步发展,20 世纪 70 年代建成的日本滨名大桥,主跨 240m; 1979 年巴拉圭建成主跨 270m 的阿松星 (Asuncion) 桥; 1982 年美国休斯敦 (Houston) 运河桥跨径为 114m + 228.6m + 114m,这是跨径较大、时间较早的连续刚构桥,主梁为单箱双室截面,刚性桥墩; 1985 年澳大利亚建成了当时世界上最大跨径连续刚构桥——Gateway 桥,其主桥跨径为 145m + 260m + 145m,该桥采用双薄壁柔性墩,单箱单室截面,采用 C50 的高强度混凝土,桥墩高 47.5m,将

连续刚构—连续体系的优点充分表现了出来,该桥是里程碑式的建筑。随着强度等级为 C60 以上的轻质高强混凝土在工程中的大量使用,更大跨度更高墩的刚构桥、连续刚构桥不断涌现,1998 年挪威建成主跨 301m 的预应力混凝土刚构桥——Stolma 桥(图 1-1),1999 年挪威又建成主跨 298m 的预应力混凝土连续刚构桥——Raft Sundet 桥^[7]。

在国内,大跨径连续刚构桥起步较晚^[8],1988 年才开始从国外引入连续刚构桥的设计与建设,1990 年建成我国第一座大跨径连续刚构桥,即主跨为 180m 的广东洛溪大桥(图 1-2)。洛溪大桥在我国第一次采用大吨位预应力体系和顶板首次采用“S 形”平弯束,是中国刚构桥发展的一个里程碑,从此中国的连续刚构桥便进入快速发展阶段。随着大跨径连续刚构桥在我国的不间断应用和桥型设计有关问题的深入研究。我国在大跨径连续刚构桥的建设方面取得了举世瞩目的成果,先后建成了黄石长江大桥,主跨 245m;江津长江大桥,主跨 240m;虎门大桥辅航道桥,主跨 270m(图 1-3)。近几年,连续刚构桥在设计、施工和科研上均取得了重要的成果,建成的有云南元江大桥,主跨 265m;重庆石板坡长江大桥复线桥,主跨 330m,合龙段为 108m 钢箱梁,是世界上最大跨径的预应力混凝土连续刚构桥(图 1-4);苏通长江大桥辅桥,主跨 268m。表 1-1 列出了国内外建成的一些大跨径连续刚构桥。

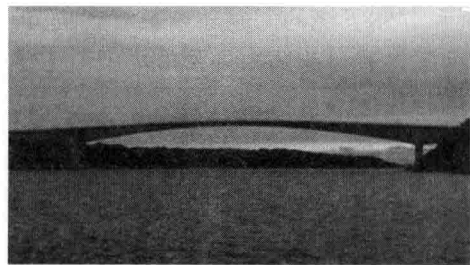


图 1-1 挪威 Stolma 桥



图 1-2 广东洛溪大桥

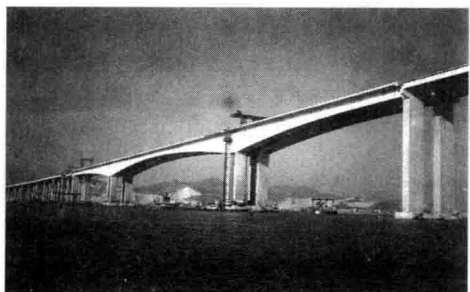


图 1-3 虎门大桥辅桥

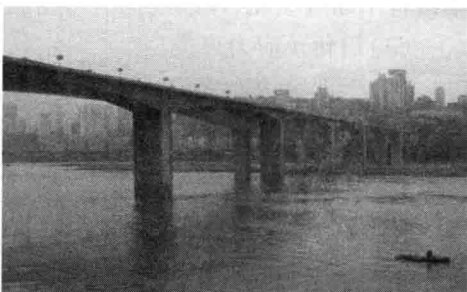


图 1-4 重庆石板坡长江大桥复线桥

国内外已建成的一些大跨径连续刚构桥

表 1-1

序号	国 家	桥 名	主跨(m)	建成年份(年)
1	中国	石板坡长江大桥复线桥	330	2006
2	挪威	Stolma 桥	301	1999
3	挪威	Raft Sundet 桥	298	1998
4	巴拉圭	Asuncion 桥	270	1979
5	中国	虎门大桥辅桥	270	1997
6	中国	苏通大桥辅桥	268	2008
7	中国	元江大桥	265	2003
8	澳大利亚	门道桥	260	1985
9	挪威	Varodd-2 桥	260	1994
10	中国	下白石大桥	260	2003

桥梁跨度逐年递增,这与科技进步、各种新型材料的出现以及设计水平的提升、施工工艺不断改进密切相关;各种复杂桥梁在我国的建成也体现了我国对于大跨、多跨、连续刚构组合桥的设计和施工技术已经非常成熟^[8]。

虽然连续刚构桥型目前的混凝土开裂和梁体下挠的问题还未最终解决,但由于其突出的优点,依然具有广阔的应用前景。从目前国内外预应力混凝土连续刚构桥的发展趋势上看,连续刚构桥的可行跨度不仅可达 350m,而且可以与预应力混凝土斜拉桥竞争。展望预应力混凝土连续刚构桥的发展方向,主要有以下特征^[9-10]:

(1)在施工工艺改善与设计水平提高的基础上,跨径将进一步增大。

(2)随着结构的优化设计及新型高强轻质材料的研究和使用,桥梁的上部结构将不断轻型化,连续刚构的跨越能力将不断提高。

(3)简化预应力束类型。

(4)上部结构连续长度将进一步增加。

(5)提高对箱梁裂缝的认识和重视,从设计、施工、管理等方面对桥梁进行全方位研究,并采取相应对策。

(6)随着交通建设逐渐向山岭重丘区发展,连续刚构桥的跨度和桥墩高度将继续增加,且多跨情况下各墩高差显著。

刚构桥的研究发展与预应力混凝土的发展及桥梁分段悬臂施工技术的发展紧密联系。随着预应力和悬臂施工体系的发展,大跨径桥梁也迅速发展,使得高

墩特别是超高墩连续刚构桥的实现成为可能。

1.3 连续刚构桥分段施工及合龙的重要性

“近 30 年来,桥梁工程界最重大而又引人注目的成就之一,就是预应力混凝土桥梁分段施工工法的形成及其分段施工技术的大规模推广应用,而且也得到了世界各国工程界的广泛承认^[11]。”在今天,世界各国特别是桥梁建设方兴未艾的中国,都将桥梁的分段施工方法看作是一种经济快捷、适用性强、安全性高的施工方法。

与整体施工法或满堂支架施工法相比,桥梁结构分段施工是指桥梁结构的主要受力构件是由称之为梁段的单个块件,按预制或现浇(混凝土梁桥)的方式分段连成整体的施工过程。

按照分段施工概念,结合桥梁结构,特别是预应力混凝土桥梁结构的架设特点,桥梁分段具有三种基本形式,即“纵向分段施工”、“横向分段施工”和“竖向分层分段施工”。但在实际工程中,横向分段施工通常称为装配式桥梁施工,竖向分层分段施工又被看作是组合桥梁施工,唯有梁段的纵向连接的施工方法——纵向分段施工才是真正意义上的分段施工。

目前大部分新建桥梁都首先考虑采用分段施工方法,主要在于分段施工法具有的一系列特点:

(1)对于各类桥型、各种跨径和不同桥长,分段施工均是一种经济有效的施工方法,并且对斜、坡、弯桥也比较容易调整。

(2)大量的应用表明,分段施工比整体施工节省 10% ~ 20% 的工程费用,因而合适的分段施工方法在经济上往往是非常实用的。

(3)分段施工可有效缩短施工周期,采用预制拼装式分段施工时更为明显,梁段可在下部结构施工时同时预制,然后在现场快速拼装,节省大量时间。

(4)分段施工有利于现场交通组织和对桥址处的环境保护,与整体施工法相比,占用更小的桥位空间。

(5)分段施工对现场施工条件的要求低。

(6)分段施工质量能够得到很好的保证,尤其是预制拼装式分段施工;即使是现场浇筑,也因为分段浇筑块件的局部性,施工质量高于整体施工的大体积块件。

(7)分段施工技术在整个施工过程中反复循环多次,无论是机具设备还是操作人员,所进行的操作大都是重复性的工作,易于培训学习,并且减小了失误

的概率,具有很高的安全性和可靠性。

分段施工法一般分为四大类,即悬臂施工、逐跨施工、逐段施工和顶推施工^[12-14]。

在大跨连续刚构桥的建设中,普遍应用的是悬臂分段施工方法。悬臂施工方法一般可分为悬臂浇筑施工和悬臂拼装施工两种形式,悬臂浇筑是在桥墩两侧对称段逐段就地现浇混凝土,待混凝土达到一定强度后进行张拉预应力筋,移动机具模板、挂篮继续悬臂浇筑;悬臂拼装是用吊机将预制梁段在桥墩两侧对称起吊,安装就位后固定紧固件或张拉预应力筋,使悬臂不断接长,直至合龙。

在连续刚构桥的分段节段施工中,桥梁的合龙标志着桥梁主体结构即将结束,同时也是桥梁施工的关键环节。悬臂浇筑施工的连续刚构桥、连续梁桥、斜拉桥、拱桥,合龙段施工质量尤其重要,是桥梁建设成败的重要标志。连续刚构桥悬臂浇筑合龙段施工是悬臂浇筑施工中的关键,合龙施工是连续刚构桥施工中最关键的施工工序之一。由于连续刚构桥是大型预应力混凝土构件,建成后可修复能力差,合龙施工是调节前期施工内力及线形误差的最后机会,合龙施工的好坏关系着整个桥梁的质量。

合龙方案的确定是预应力连续刚构桥悬臂施工的重要环节,尤其在多跨连续刚构桥中,合龙方案的选择不仅对合龙过程中结构的内部应力和监控提供的预抛高会产生明显影响,而且关系到施工安全、周期、成本等因素。因此对合龙方案的选择在满足规范要求的情况下,应根据地形、地质、交通、水文、边跨和中跨的比例、受力和稳定性等条件决定^[15-21]。

合龙对桥梁的主要影响如下。

(1) 影响合龙时桥梁结构的安全和成桥后到运营期的安全性和耐久性;

(2) 合龙改变了合龙段所在跨的静定性质及浇筑梁段的收缩徐变进程,随着超静定次数和收缩徐变的变化,桥梁将产生与施工关联较大的次内力及内力重分布,影响成桥结构的位移和内力状态;

(3) 合龙顺序是施工控制的敏感因素,合龙的内容不同,施工的难易程度就有所不同,对误差积累有明显影响;

(4) 合龙顺序直接关系到各墩的施工进度安排,对工期和成本都有极大影响;

(5) 先合龙的地方,将首先完成其所在桥跨由静定到超静定的转换,且随着合龙进程的推进,结构超静定次数会越来越高;

(6) 因为各桥墩施工时间的差异,导致各梁段材龄不同,从而影响混凝土收缩徐变完成的早晚和快慢,从而导致成桥状态结构内力与位移的差异。

大跨径预应力混凝土连续刚构桥的悬臂施工是从0号块分段向前推进的。合龙段施工前,若两端梁体高差较大,将使桥面线形出现错台,影响合龙质量和桥梁美观,为了消除这种误差,常在合龙配重时,通过人为不平衡配重进行调节,并加强合龙锁定骨架的刚度。在合龙张拉完后释放骨架,使内力重新分配。另外,也可以放松高端的临时固结,使其挠度加大,以利于合龙施工。应该指出的是,上述通过压重等措施强行合龙,会使结构产生巨大的附加内力,最终对桥梁的受力性能是不利的,它只是一种补救措施。预应力混凝土连续刚构桥在节段浇筑完成后具有不可控性,基本上没有调整的余地,如控制不好,会在合龙段由于误差过大造成合龙困难,可见合龙段两侧悬臂端头高差大小是影响合龙质量的重要因素^[22]。

随着国家交通事业的发展,西部大开发的深入进行,西部山区交通设施建设得以前所未有的发展,但由于西部山区特殊的地形限制,使得桥梁建设的发展日益朝着多跨高墩的方向发展。多跨情况下的合龙顺序已成为影响合龙的重要因素之一。合龙段是在悬臂梁端和悬臂梁端或悬臂梁端和现浇梁段之间,所以悬臂段和现浇段的高程、现浇段的施工方式也会影响合龙。顶推和施加配重对长悬臂端的竖向挠度产生很大影响。同时,温度及收缩徐变作用对结构受力性能的影响问题仍未很好地解决。

因此,影响合龙段施工质量成败的关键因素有:合龙顺序、合龙段配重、劲性骨架的设计、顶推力的施加、临时束的施加、合龙温度的选择、混凝土收缩徐变等。但实际的设计和施工中往往容易忽略计算,甚至一部分施工技术人员对合龙段各要素的作用理解不深,严重影响了合龙段的质量。因此,需采取必要措施,以保证合龙段的质量。

1.4 大跨径连续刚构桥合龙研究概况

连续刚构桥是在连续梁桥和T形刚构桥的基础上逐渐发展起来的,在桥梁的设计和施工过程中,计算和分析大都沿袭以前的方法、手段,合龙阶段的设计施工也与连续梁桥、T形刚构桥相差不多。由于连续刚构桥的自身特点与具体桥梁的实际情况不同,在合龙问题的处理上,又与前两者不完全相同。

我国首先正式研究刚构桥合龙方案的工作,始于山东东明黄河公路大桥(刚构—连续梁组合体系)的建设^[23]。当时由于经济性和工期的考虑,对传统的合龙顺序和多跨一次合龙的顺序进行了比较,探讨了多跨一次合龙的可能性和利弊。经过分析得出五跨一次合龙的分期合龙方案是可行的。实施结果也表

明,该方案内力分布良好,经济效益明显。

陈列、徐公望^[24]在对渝怀铁路沿线高墩大跨预应力混凝土桥各桥式(连续梁或连续刚构桥)方案及其合龙顺序选择的研究中,对两桥式的合龙顺序进行了探讨,提供了方案比较的思路和步骤,并对边跨现浇段、各合龙段的施工方案作了论述,对连续刚构桥的合龙设计、施工有一定参考价值。

王中南^[25]对官洋溪特大桥边跨合龙方案分析时,利用挂篮新的合龙方案改装成吊架进行计算比较分析,探讨在地形陡峻、山高谷深的条件下,连续刚构、连续梁边跨合龙设计、施工取消现浇支架的可行性,供工程设计、施工参考。

吴关良、颜东煌^[26-27]以贵州平寨特大桥主桥为工程背景,阐述了当今桥梁结构分析的有限元法,包括平面杆系有限元法、空间有限元法和工程结构优化设计理论。利用平面杆系有限元程序 BDCMS 建立贵州平寨特大桥主桥有限元计算模型,对其进行施工正装计算,复核计算了成桥运营阶段及施工阶段在永久作用、可变作用、作用效应组合下的结构线形和受力状态。此外还进行了混凝土收缩徐变作用对桥梁结构的影响分析、均匀温度作用和温度梯度作用对混凝土箱梁的影响分析,并对合龙顺序施工方案进行了优化研究,得出了一些对设计有益的结论。

杜细春^[28]以伊犁特大桥为例,对刚构—连续组合梁桥的合龙技术从设计、施工、监控等方面做了分析,特别对刚构—连续组合梁桥的边跨、中间跨的合龙方式进行了对比,分析了不同边跨合龙方式对结构力学性能的影响,中间跨合龙段施工的工艺处理措施,介绍了合龙段混凝土浇筑过程及相关工艺要求,对各种施工工艺做了对比分析,对大跨度连续刚构桥的合龙施工及施工监控工作都有很强的借鉴意义。

周光伟等^[29]以一座大跨预应力混凝土连续刚构桥为工程背景,分析了不同的合龙温度对桥梁结构内力的影响,并指出合龙温度对连续刚构桥设计的影响主要是对桥墩与桩等有关控制截面最不利组合内力的影响,得出在一般情况下,选择低温合龙对结构受力有利的结论;结合该桥高温合龙的实际情况,提出了连续刚构桥在高温合龙情况下采取预施加反顶力的施工对策,并通过结构分析与工程实践证明了采用该措施的有效性。

罗金标等^[30]介绍了聚龙特大桥合龙段施工的方法和工艺流程,对施工中出现合龙高差超限问题,提出了水箱压重和混凝土配重块压重的配重方式,并对两种配重方式进行了研究分析,最后在施工中实践了水箱压重的方法,使大桥顺利合龙,并使合龙精度达到施工规范。

现阶段连续刚构桥多跨体系箱梁桥的建设中,经常使用的体系转变步骤一

般为 T 构—II 构—分段连续—形成全桥,常有如下几种:

(1) 每次合龙一跨,从桥的一岸逐跨向另一岸推进,或从两端向中间推进,或从中间对称交替向两边延伸,直至完全合龙。每合龙一个 T 构,将后方墩梁的临时固结解除。该方法的优点是每个 T 构受力基本相同,合龙时桥墩只承受一跨的温度应力,施工容易。但对施工顺序要求严,作业面少,工期长。

(2) 单 T 构先静定“小合龙”,再按既定顺序进行超静定“大合龙”。各墩顶悬臂施工形成 T 构以后,先两两合龙形成稳定的 II 构,然后将各 II 构逐个连成整体。II 构的连接称为超静定大合龙,并伴随着结构体系转换,内力重分布。它可以是从中间 2 个 II 构开始,依次向两侧延伸,每侧连接 1 个 II 构;也可以是从两边开始,最后两半桥正中间合龙成全桥。该方法施工可以全面进行,互不干扰;小合龙形成稳定结构,比较安全;个别 T 构施工受阻,对全桥无决定性影响;体系转换对称进行,桥墩和每跨箱梁受力比较均匀合理。

(3) 大、小合龙方式综合采用。多跨长桥,由于桥墩多,需多工点同时施工,而挂篮因数量有限,必须分批倒用,先后施工,现场情况又千变万化、十分复杂,往往使上述较理想的方案不能得到完全实施。因此综合采用上述方法。

多跨连续刚构桥梁,一般都采用对称的方式合龙各跨,要么从边跨同时向中跨合龙,要么从中跨对称向边跨延伸。当工期紧张时,也有桥梁采用先“小合龙”、再“大合龙”的方法,甚至多跨一次性合龙,但处理时均注意结构的对称性。另外,也因其墩梁固结,具有足够的稳定性,合龙顺序的选择还要根据大桥地形、交通、水文、地质、边跨和中跨的比例、受力和稳定性等条件确定^[31-38]。

总之,合龙施工是施工技术的重要组成部分,合龙方案的选取在大跨径桥梁的施工中已成为关键的环节。由于大跨径连续刚构桥采用悬臂施工,且跨径大、连续孔数多,有效地实施施工控制对桥梁施工过程中的结构安全、确保最终大桥的顺利合龙,以及成桥状态的线形和受力情况符合设计要求,是必不可少的。

1.5 一次合龙技术的提出

大跨连续刚构桥梁结构的分段施工一般要经历一个长期复杂的施工阶段。按照传统的合龙工艺,多跨连续刚构桥的合龙需经过几次结构体系的转换,随着施工阶段的推进,桥梁的结构形式和荷载作用方式等都在不断发生变化。结构中的最终恒载内力与施工合龙的程序有关,不同的施工程序,由于它们的初始恒载内力不同,在体系转换的过程中,由徐变引起的内力重分布的数值也不同。采用不同的合龙顺序对整个桥梁建设的工期和成本的影响也不同,因此,选择正确