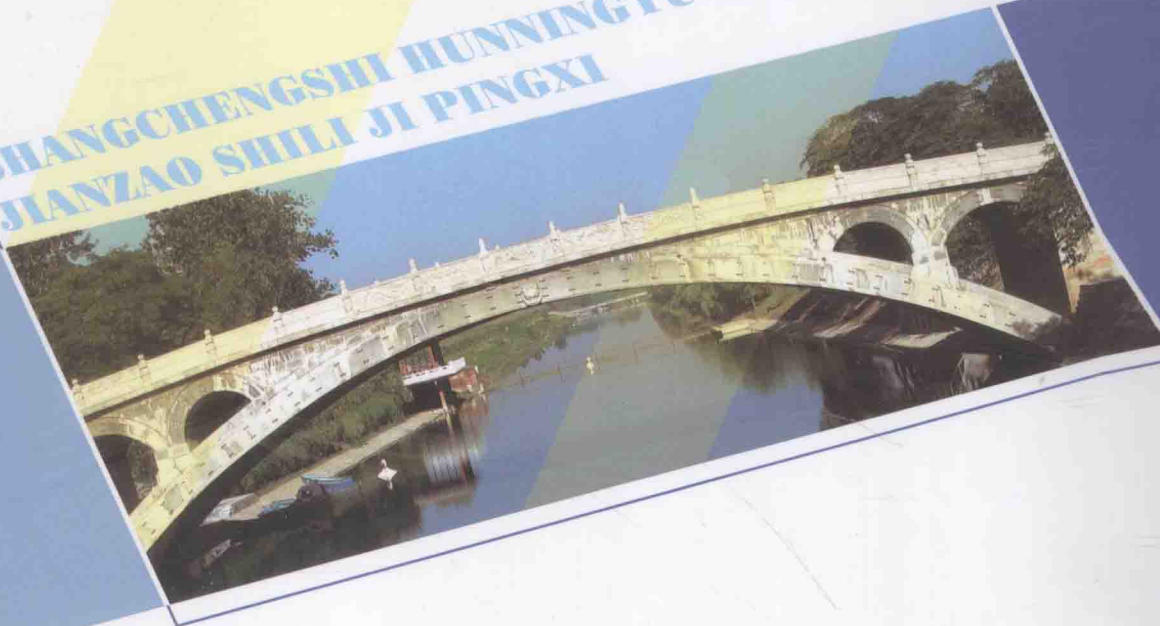


SHANGCHENGSHI HUNNINGTU GONGQIAO
JIANZAO SHILI JI PINGXI



上承式混凝土拱桥 建造实例及评析

■ 编著 严允中 杨虎根 许伟 曾爱

■ 主审 向中富 顾安邦



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

Shangchengshi Hunningtu Gongqiao Jianzao Shili ji Pingxi
上承式混凝土拱桥建造实例及评析

编著 严允中 杨虎根 许 伟 曾 爱
主审 向中富 顾安邦



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

内 容 提 要

本书以上承式混凝土拱桥为主线,按照五大类施工方法分别介绍了国内外若干实桥的施工工艺及结构设计情况,并对各类施工方法的特点、优势与不足进行了探讨。根据国内已建成的 143 座上承式混凝土拱桥的有关资料进行统计分析,提出了常用的等截面箱形拱桥拱圈构造与设计的参考数据。对上承式混凝土拱桥结构设计与分析计算若干重要问题以及发展趋势进行了分析讨论。

本书可供从事桥梁工程可研、设计、施工、监理、养护等工作的技术人员使用。

图书在版编目(CIP)数据

上承式混凝土拱桥建造实例及评析/严允中等编著.

—北京:人民交通出版社股份有限公司, 2015.2

ISBN 978-7-114-12000-8

I.①上… II.①严… III.①混凝土结构—上承式桥—拱桥—桥梁施工 IV.①U448

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 013677 号

书 名: 上承式混凝土拱桥建造实例及评析

著 作 者: 严允中 杨虎根 许 伟 曾 爱

责任编辑: 尤晓玮

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.ccpres.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: 787×1092 1/16

印 张: 16.75

字 数: 394 千

版 次: 2015 年 2 月 第 1 版

印 次: 2015 年 2 月 第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-114-12000-8

定 价: 48.00 元

(有印刷、装订质量问题的图书由本公司负责调换)

前言

拱桥既是一种具有实用功能的构造物,又是一种优美的建筑物。在很多情况下,拱桥的结构设计与美学考虑是密切相关的。国内外一些著名的拱桥,不仅在技术上有所创新、有所发展,在桥梁与地形协调体现优美景观的整体布局上以及体现特有的文化内涵上都有上乘的表现。拱桥在我国具有悠久的历史,蕴藏着十分深厚的文化和地方特色元素。我国古代桥梁中,拱桥占了最重要的位置,遍布全国各地。按材料划分,有石、砖、竹木及砖石混合等数种,其中石拱桥使用最广,留存最久,直至现代桥梁仍在采用。拱桥在立面上形成各种曲度的曲线,比如优美平顺曲线、连拱情况下的波形曲线以及大拱上叠小拱的双层甚至三层曲线。古时称拱桥为曲桥、飞梁、虹,包含了绘画艺术的含义。在祖国的广阔土地上,至今仍留下了不少杰出的古代拱桥作品。较为著名的有:

北京故宫内、外金水桥,建成于明朝永乐年间(公元1417~1421年),天安门前的金水桥称为外金水桥,故宫内的称为内金水桥。内外金水桥都不是单座桥,而是由若干桥组成的拱桥建筑群。玲珑秀丽的外金水桥和天安门红墙、城楼、石狮、华表一起组成的艺术建筑群体,已经成为首都北京甚至成为中华人民共和国的象征。

北京颐和园十七孔桥,建成于清朝乾隆年间。中间一孔最为高大,由此向两侧逐渐缩小。从两端向中孔数去,均为“九”。古文化认为“九”是最大的阳数,封建皇帝也被称为“九五”。从建筑艺术上看,十七孔桥是最美的古代桥梁之一。

北京卢沟桥,建成于金章宗完颜璟明昌三年(公元1192年),是一座多跨连拱石拱桥。卢沟桥在中国当代历史上具有重大意义。1937年7月7日,侵华日军在这里炮轰桥东头的宛平城,当地守军奋起抵抗,这就是震惊中外的“七七事变”,也称为“卢沟桥事变”。它揭开了我国全民族反抗日本帝国主义的正义战争——抗日战争的序幕,是我国八年艰苦抗战的起点,具有重大历史意义。

河北省赵州桥,建成于隋文帝开皇年间(公元591~599年)。其跨度为37.02m,这个纪录在我国保持了1300多年之久,建成后服役至今超过了1400年,被称为超长寿命的桥梁。在大拱圈之上布置空腹式腹拱,既减轻了拱上自重,又增大了泄洪面积,还减小了水流对桥梁基础的冲刷。这种结构布局,在当时是一种重大的技术创新。美国建筑专家伊丽莎白·莫斯克在其《桥梁建筑艺术》一书中赞誉赵州桥时写道:“结构如此合乎逻辑,造型如此美丽,使大部分西方古桥在对照之下,显得笨重和不明确”。赵州桥是中国古代桥梁的一颗耀眼的明珠,建造该桥的领头人李春,是中国古代桥梁伟大的建筑师。

新中国成立后,混凝土拱桥的建造取得了一系列重大进展,在上承式钢筋混凝土拱桥方面,有下列一些具有代表性的桥梁:

20世纪50年代末至70年代,国家基本建设资金缺乏,钢材货源少、价格高,为了发展公路交通,创造了“双曲拱桥”这种造价低、钢材用量少的桥型,采用“化整为零,以零凑整”的施工工艺,降低了施工难度,加快了施工进度。1968年首次提出了钢丝绳斜拉扣挂悬拼双曲拱

拱肋的施工方法,首创了双曲拱桥无支架施工工艺,为混凝土拱无支架施工奠定了技术基础。

1969年建成的广东佛山澜石大桥,为我国首座钢拱架上现浇的箱形拱桥,孔跨 $4\times 60\text{m}$ 。

1970年建成的四川义敦巴楚河桥,为我国首座采用天线吊装的箱形拱桥。

1977年首次在四川遂宁县采用平转法建成跨径为 70m 的箱形拱桥;1987年建成的四川巫山龙门大桥,主跨 122m ,为我国首座无平衡重平转施工箱形拱桥;1989年建成的重庆涪陵乌江大桥,主跨 200m ,采用无平衡重平转施工。转体施工上承式混凝土拱桥的跨径首次突破 200m 。

1992年首次提出钢绞线斜拉扣挂悬拼法,使拱桥悬臂施工法获得重大进展,跨越能力大幅提高。

1990年建成的四川广元三滩刚架拱桥,跨径 60m ,国内首次采用正角度(从下往上转体)竖转施工工艺。2008年建成的贵州务川珍珠大桥,主跨 120m ,国内首次采用负角度(从上往下转体)竖转施工工艺。

主跨 420m 的重庆万州长江大桥,为钢管混凝土劲性骨架上承式RC箱形拱,于1997年建成,至2014年保持约17年世界最大跨径上承式混凝土拱桥的纪录。在设计、施工若干重要领域,取得了突破性重大进展。

2014年正在建设的贵州北盘江铁路大桥,主跨达 445m ,采用钢管混凝土劲性骨架法施工,为上承式钢筋混凝土无铰拱,将成为这种桥型新的跨径世界纪录。

2007年建成的四川攀枝花白沙沟大桥,主跨 150m ,是国内首座采用挂篮悬浇法施工的上承式RC箱形拱桥。它填补了我国大跨径混凝土拱桥塔架斜拉扣挂悬臂现浇法施工的空白,也积累了若干重要技术经验。

2007年建成的福建宁德天池大桥,主跨 205m ,为国内目前最大跨径悬臂施工法——塔架斜拉扣挂拼装法(国内简称天线吊装法)施工的上承式RC箱形拱桥。

到目前为止,我国在石拱桥、钢箱拱桥、钢桁拱桥、混凝土拱桥和钢管混凝土拱桥等拱式体系桥梁的最大跨径均居于世界首位,已进入世界拱桥大国和强国的行列。但在现代混凝土拱桥重要的施工方法之一的悬臂桁架法与组合施工法方面以及有些特殊桥型结构方面(如刚梁柔拱),与世界先进技术比较,仍存在差距,我们有待进一步努力。

由于技术与材料的进步,国内已很少采用石拱桥。钢拱桥仅在某些特殊情况下采用。RC箱形拱桥与钢管混凝土拱桥是近期发展较快的两种拱式桥梁。两者最大跨径目前分别达到 445m (贵州北盘江铁路大桥)和 530m (四川合江长江大桥)。这两种桥型及其主要施工方法各有优势与不足之处,都应在发展中趋利避害,一起推动我国拱桥的发展。

在混凝土拱桥中,上承式拱桥占有很大的比例,尤其是山岭地区,更显突出,成为混凝土拱桥的主要结构形式,在公路、城市道路建设中广泛采用。本书主要涉及上承式混凝土拱桥,但不讨论这种桥型结构在设计、施工方面进行系统的论述,而是根据我国上承式RC拱桥的设计、施工经验,并结合国外同类桥型的主要成就,对一些主要问题进行讨论,并介绍国内外若干大桥的施工、设计实例,供业内同行参考。

我国上承式混凝土拱桥拱圈的施工方法,除悬臂桁架现浇法暂无实例外,其余均有实例。其中悬臂桁架拼装法,目前仅限于桁式组合拱桥,其最大跨径为1995年建成的江界河大桥,主跨 330m ;采用组合施工法的混凝土拱桥也很少。本书附录A所列我国上承式混凝土拱桥共计194座,各种施工方法对应的座数分别为:落地支架现浇法47座,钢拱架现浇(拼装)法31

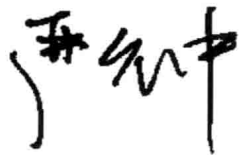
座;转体施工法 23 座;钢管混凝土劲性骨架法 11 座;挂篮悬臂浇筑法 3 座;天线缆索吊装法 79 座。其中所占比例最高的是天线缆索吊装法,达到 38.9%。说明在跨径 200m 以下,天线缆索吊装至今仍是最主要的施工方法。但跨径超过 200m 后,我国在悬臂桁架施工法没有较大突破性进展的情况下,钢管混凝土劲性骨架法得到了快速发展。

本书附录 B 为国外部分上承式混凝土拱桥的简况,共计 160 座桥梁。其中跨径 $\geq 120\text{m}$,且施工方法明确的共计 65 座,其中落地支架法 12 座;钢拱架法 9 座;转体施工法 1 座;劲性骨架法 4 座;挂篮悬浇法 14 座,天线缆索吊装法 2 座;悬臂桁架现浇法 2 座;悬臂桁架拼装法 3 座;组合施工法 18 座。所占比例最高的是组合施工法,其次是挂篮悬臂浇筑法。这与国内的情况有所不同。值得我们注意的是,组合施工法在大跨径混凝土拱桥发展过程中,日益显示出其优越性,应该引起我们的重视,并应在设计与施工中积极实践。

国外,主要是欧美和日本等工业发达国家,在混凝土拱桥的建造方面,取得若干重大成就。如 1980 年建成的南斯拉夫·克尔克桥(主跨 390m 与 244m),为上承式 RC 箱形拱桥,采用悬臂桁架拼装法施工;2011 年建成的美国胡佛水坝大桥(主跨 323m),为上承式箱形双肋混凝土拱桥,采用塔架斜拉悬臂浇筑法施工;1964 年建成的澳大利亚·悉尼格拉特斯维尔桥(主跨 364.8m),为上承式素混凝土箱肋无铰拱桥,采用可横移的钢管拱架拼装法施工;2002 年建成的葡萄牙·亨里克桥(主跨 280m),为上承式刚性梁柔性拱桥,采用悬臂桁架现浇法施工;1989 年建成的日本·别府明矾桥(主跨 235m),为上承式不对称 RC 无铰拱,采用悬臂桁架与劲性骨架组合法浇筑主拱圈。国外上承式混凝土拱桥的技术成就与实例,在本书有关章节中介绍,供我国桥梁建设者参考。

设计与施工实践表明,混凝土拱桥尤其是大跨径混凝土拱桥,跨径、结构设计与施工方法是三个重要而又相互制约影响的关键性因素,是桥梁总体方案应认真研究的主要内容。本书对设计计算的有关论述,尽可能结合施工方法展开讨论,在介绍施工方案时,也尽量表述结构设计的情况。同时,在某些问题上还提出了编著者的一些想法和初步分析成果,仅为笔者的浅见,供读者参考,不当之处敬请斧正。书中如有差错或新的补充意见,恳请直接发至作者的电子邮箱 379772868@qq.com,以便随后进行修正或补充完善。在本书编写过程中,我们参阅了大量论文、专著和技术资料,详见“参考文献”。在此向有关作者深表谢意。向中富教授、顾安邦教授对全书进行了认真的审查,提出了很多宝贵的意见,在此一并表示感谢。

本书的出版,得到了贵阳建筑勘察设计院有限公司(该公司为贵州建勘企业集团全资子公司,是集建筑和市政公用工程设计、岩土工程勘察、设计、治理、地质灾害评估以及房屋建筑和市政公用工程施工于一体,具有较强综合实力的勘察设计公司,详情可参阅网站 <http://www.jzksj.com/>)的大力支持,在此表示特别感谢!最后,向给予帮助与支持的众多朋友及同事一并表示由衷的谢意!



2014 年 8 月于贵阳

目 录

第 1 章 上承式混凝土拱桥发展概况	1
第 2 章 上承式混凝土拱桥施工方法分类	6
2.1 落地支架现浇法	6
2.2 钢拱架现浇(拼装)法	7
2.3 转体施工法	7
2.4 劲性骨架法	8
2.5 悬臂施工法	8
2.6 组合施工法	10
第 3 章 上承式混凝土拱桥拱圈构造	11
3.1 板拱与肋拱	11
3.2 拱圈截面构成的两种基本形式	11
3.3 拱圈高度	11
3.4 拱圈宽度	12
3.5 箱形截面拱圈的构造	13
3.6 关于拱箱预制构件的轻型化	14
3.7 箱形截面肋拱	15
第 4 章 上承式混凝土箱形拱桥拱圈常用尺寸及配筋	17
4.1 既有上承式混凝土箱形拱桥等截面拱圈高度统计分析	17
4.2 拱圈常用尺寸	19
4.3 上承式混凝土箱形板拱桥拱圈主要配筋	20
第 5 章 上承式混凝土拱桥施工实例	21
5.1 落地支架现浇法施工实例	21
5.2 钢拱架现浇法施工实例	24
5.3 转体施工法施工实例	37
5.4 劲性骨架法施工实例	47
5.5 悬臂法施工实例	54
5.6 组合施工法施工案例	82
5.7 具有特色的几种施工方法实例	85
第 6 章 上承式混凝土拱桥施工方法评析	88
6.1 落地支架现浇	88
6.2 钢拱架现浇(拼装)法	95
6.3 转体施工法	105
6.4 劲性骨架法	114

6.5 悬臂施工法——天线缆索吊装法	122
6.6 悬臂施工法——挂篮悬臂浇筑法	130
第 7 章 上承式混凝土拱桥结构设计有关问题的讨论	135
7.1 孔跨布置	135
7.2 矢跨比	140
7.3 拱上建筑布置	146
7.4 拱座基础	155
7.5 主拱设计与施工方案	157
7.6 刚性梁柔性拱桥	161
7.7 无铰拱桥与有铰拱桥	165
7.8 桁式组合拱桥有关问题的探讨	168
第 8 章 上承式混凝土拱桥结构分析计算有关问题讨论	171
8.1 主要结构形式及其特点	171
8.2 拱桥计算理论的简要回顾与讨论	178
8.3 拱的压力线与拱轴线	183
8.4 RC 箱形拱腹板与顶板结合面抗剪验算	193
8.5 转体施工上承式 RC 箱形拱桥结构分析计算与讨论	194
8.6 上承式混凝土拱桥温度、混凝土收缩徐变效应分析	208
第 9 章 上承式混凝土拱桥发展趋势	216
附录 A 国内部分上承式混凝土拱桥简况	223
附录 B 国外部分上承式混凝土拱桥简况	230
附录 C 交通部标准图《缆索吊装箱形拱桥》(JT/GQB 047—83)要点	247
参考文献	249

第 1 章 上承式混凝土拱桥发展概况

我国最早的混凝土拱桥,是新中国成立前建成的粤汉铁路上的碓凯冲桥、省界桥和燕塘桥,主孔跨径均为 40m,RC (Reinforced Concrete, 钢筋混凝土) 结构。

20 世纪 60 年代至 80 年代,在大量修建双曲拱桥的同时,箱形拱桥首先在公路桥梁上出现,并迅速发展。尤其是山岭重丘区,上承式箱形拱桥显示了强大的生命力。国内第一座箱形拱桥为四川义敦巴楚河桥,跨径 30m,天线吊装,1970 年建成。较早建成的还有以下几座:

四川米易小街桥(2×60m,1972 年),四川攀枝花新庄桥(146m,1972 年),四川乐山岷江桥(6×70m,1973 年),四川宜宾岷江一桥(2×100m,1973 年),云南红旗桥(116m,1974 年),重庆彭水乌江桥(2×100m,1974 年),四川雅砻江新龙桥(65m,1974 年),贵州余庆大乌江桥(105m,1976 年),四川宜宾马鸣溪桥(150m,1979 年)等。

其中,四川攀枝花新庄桥(后来称为 3006 号桥),采用专用钢拱架上现浇拱圈,是我国最早采用钢拱架现浇施工的大跨径箱形拱桥(1972 年)。其他几座桥均采用天线缆索吊装施工。尤其是宜宾马鸣溪大桥,主跨 150m,拱箱分为 5 段吊装,为缆索吊装箱拱积累了宝贵的设计、施工经验。

另外,1969 年建成的广东佛山澜石大桥则是首座采用贝雷桁片作为拱架建成的上承式 RC 箱形拱桥,孔跨为 4×60m。

从 20 世纪 80 年代初开始,由于箱形拱桥结构受力的突出优点,逐渐取代了同是上承式混凝土拱桥的双曲拱桥,成为上承式混凝土拱桥的主流桥型。据文献[48]介绍,截至 2010 年 7 月,以跨径不小于 100m 的拱桥为分析对象,共收集到钢拱桥 52 座,钢管混凝土拱桥 180 座,混凝土拱桥 203 座的资料。其中,混凝土拱桥占 46.7%,在山岭重丘区,混凝土拱桥所占比例更高,且大部分为上承式拱桥。

20 世纪 90 年代以后,钢管混凝土拱桥发展很快,其跨径不断被突破,四川合江长江大桥——中承式钢管混凝土拱桥已达到 530m,超过上承式钢筋混凝土箱形拱桥最大跨径的重庆万州长江大桥(主跨 420m)。混凝土拱桥的发展势头有所减缓。但是在高山深谷地区,大跨径上承式箱形拱桥,仍是可供选择的主要桥型之一。

上承式箱形拱桥的发展与拱圈施工工艺的技术创新密不可分。1975 年,我国桥梁工作者开始进行“拱桥转体施工工艺”的研究,并于 1977 年首次在四川省遂宁县采用平转法建成跨径为 70m 的 RC 箱肋拱,为拱桥施工技术的发展做出了重要贡献。1989 年建成的重庆涪陵乌江大桥,主跨 200m,采用无平衡重平转施工;1987 年建成的四川巫山龙门大桥,主跨 122m,为国内首座无平衡重平转施工上承式箱形拱桥。目前,转体施工最大跨径上承式箱形拱桥,为福建行对岔大桥,主跨 205m。

1990 年建成的四川广元市三滩刚架拱桥,跨径 60m,国内首次采用正角度(从下往上转体)竖转施工工艺。

2008 年建成的贵州务川珍珠大桥,为主跨 120m 上承式箱肋拱桥,国内首次采用负角度

(从上往下转体)竖转施工工艺。

2010年建成的云南大岩洞桥,为主跨160m上承式箱形拱桥,采用钢管混凝土劲性骨架平转施工,转体重量5200t,骨架合龙后浇筑拱箱混凝土。

1996年以前,箱形拱桥的拱箱预制节段所采用的天线缆索吊装施工工艺,由于采用钢丝绳、滑轮组、卷扬机形成的扣索系统,存在位移量不易控制、测力不准、操作困难,尤其是安装节段之间的连接为铰接或半铰接,段数较多时容易发生较大变位。所以,拱箱纵向分段数受到限制,目前按此施工工艺(简称为旧工法)吊装的箱形拱,分段数都在7段以内。分段数过多,空中悬拼安装过程存在较大风险,故旧工法的适用跨径受到较大限制。为了克服旧工法的缺点,20世纪90年代初,广西的桥梁建设者进行了研究,提出了天线缆索吊装预制拱箱节段的新工艺,克服了旧工法的主要缺点(关于新工法工艺要点,请参阅本书第8章)。在施工技术上的重大突破,是我国拱桥施工工艺又一重要的技术创新,使混凝土拱桥向更大跨径发展有了可靠的施工手段。新工法于1996年首先在广西邕宁邕江大桥(主跨312m钢管混凝土劲性骨架中承式RC箱形拱)成功应用。同时,1996年建成的广西来宾磨东红水河大桥(主跨180m,上承式RC箱形肋拱)也采用新工法施工。实践证明,新工法施工方便、安全可靠、技术成熟。

1890年,奥地利工程师J.Melan发明了用型钢做拱式骨架现浇混凝土拱圈的创新工艺(称为米兰法)。1897年,Fritz von Emperger改进了米兰法,采用格构式钢构件取代型钢,提高了承载力,节约了钢材。米兰法的应用,使混凝土拱桥的跨径增大到100m以上。1929年建成的德国Echelsbach桥,跨径达到130m。1942年,西班牙采用米兰法建成的埃斯拉铁路桥,跨径达到210m。这种施工方法于20世纪80年代引入我国,首先在辽宁蚂蚁沙大桥上应用(跨径60m),以后又在吉林丹东沙河口大桥上使用(跨径156m)。交通部设立科研课题,以四川宜宾小南门金沙江大桥为试验桥进行研究,并于1990年建成主跨240m的中承式拱。由于采用钢格构骨架,其整体刚度较弱,施工中出现险情。为了提高劲性骨架的整体刚度和浇筑混凝土时的承载力,提出了钢管混凝土劲性骨架的新思路。1993年建成的四川内江市新龙坳大桥,为主跨120m中承式RC拱桥,系国内首座采用钢管混凝土劲性骨架法施工的混凝土拱桥。世界最大跨径的钢管混凝土劲性骨架上承式RC箱形拱桥——重庆万州长江大桥于1997年建成。同类的大跨径RC箱形拱桥还有1996年建成的广西邕宁邕江大桥(312m中承式拱)、2011年建成的四川广元昭化嘉陵江大桥(上承式,主跨350m),2012年建成的陕西汉江大桥(上承式,主跨330m),2012年建成的重庆奉节梅溪河大桥(上承式,主跨310m),2012年建成的湖南猛洞河大桥(上承式,主跨250m)。高速铁路上两座超过400m跨径的钢管混凝土劲性骨架法施工的混凝土拱桥正在施工。

有的桥梁专家估计钢管混凝土劲性骨架法与钢绞线斜拉扣挂悬臂施工工艺相结合的桥梁结构设计与施工工艺,可使RC箱形拱桥的跨径突破500m。

文献[72]指出:用劲性骨架法建造大跨度RC箱形拱的关键是施工时的安全度和稳定性问题。已竣工的几座拱桥,在施工中有的出现过惊险情况,有的还留有硬伤。重庆万州长江大桥设计时将上述问题列为重点研究课题,取得了重要成果。这方面的问题,近年业界继续进行了深入研究,并在实桥中加以应用。本书将在后面有关章节进行讨论。

用悬臂法施工RC拱桥,可以分为两种基本的施工方法。

(1)斜拉扣挂法

在两岸设置索塔,布置扣索与锚索,逐段施工拱肋或拱圈。可以是逐段现浇混凝土,也可

以是逐段拼装预制构件。

例如,2000年建成的德国维尔德格拉桥(主跨252m),采用斜拉扣挂悬臂浇筑法施工。国内第1座采用斜拉扣挂悬臂浇筑法施工的上承式RC箱形拱桥为四川攀枝花白沙沟1号大桥,主跨150m,于2007年建成。国内习惯称为“挂篮悬臂浇筑法”。采用这种施工工艺建成的还有贵州思南至剑河高速公路木蓬大桥,为主跨165m上承式RC箱形拱桥,2012年建成。四川攀枝花新密地大桥,主跨182m,为目前国内最大跨径挂篮悬浇上承式RC箱形拱桥。

斜拉扣挂悬臂浇筑法,适用于山区陡峭峡谷和湍急河流上建桥,主要优点是施工安全、结构的整体性好、施工拱圈线形易于控制,对环境生态影响较小。

克罗地亚先后于1997年和2005年建成马斯利尼察桥(主跨200m)和斯科拉丁河桥(主跨204m),均为上承式箱形拱桥,单箱双室截面,拱圈外部尺寸,前者高4m、宽9m,后者高3m、宽10m,均采用移动挂篮悬臂浇筑法施工拱圈,节段长度5.25m。前者桥面总宽度20m,可参阅文献[74]。

斜拉扣挂法也可用于悬臂拼装预制拱段。例如1994年建成的美国纳奇兹公园小道桥,主跨177.4m。国内较早采用的天线缆索吊装悬拼预制拱箱节段的施工工艺,应属于斜拉扣挂悬臂法。

(2) 悬臂桁架法

此工法的特点是:拱圈、拱上立柱、桥面板以及临时斜杆等同时推进,形成悬臂桁架,最后在拱顶合龙。悬臂桁架中的永久构件,可以是就地现浇,也可以用预制构件拼装。国外采用最多的是悬臂桁架现浇法。

由于施工拱圈的过程,全部荷载由悬臂桁架承力,通常不需要架设索塔,但需设置岸上的锚碇拉索,承受施工过程中悬臂桁架的桥面板拉力。

2004年建成的西班牙蒂洛斯(Tilos)桥,采用悬臂桁架法现浇拱圈、拱上立柱并安装钢桥面板。桥面宽12m。主桥跨径255m。RC拱圈为单箱双室截面,高度3m,宽6m,顶底板厚度20cm,腹板厚度25cm。拱脚段分别增厚至30cm及40cm。拱圈及拱上立柱均为高强混凝土,桥面为钢混凝土组合结构。

主要施工程序如下:

①埋入桥台基础中的锚杆,通过拉索以平衡拱圈及拱上结构悬臂施工中的桥面板水平拉力。

②拱座完成后,安装挂篮并开始悬臂桁架施工。拱上相邻两立柱之间的拱段划分为4个节段,每节段长6m,用挂篮悬浇。

③前一节段混凝土达到指定强度后,依靠挂篮自身的机械装置使其移动至下一节段的位置,张拉前一节段的临时斜拉索。立模,安装钢筋后浇筑本节段混凝土。

如此循环直至拱顶的最后一段,待前方几个节段完成后,便可拆除临时斜拉索。此桥的施工工艺可参阅参考文献[74]。

著名的南斯拉夫(现克罗地亚)克尔克(KRK)大桥,主跨390m,采用悬臂桁架法拼装预制构件,施工拱圈及拱上建筑,于1980年建成。拱圈采用单箱三室截面,高度6.5m,宽度13m,边室外腹板厚度35cm,顶底板厚度30至40cm。中室顶底板及腹板厚度均为15cm。顶底板及腹板均为预制构件,在悬臂施工中浇筑湿接缝连接。施工中由拱圈、拱上立柱、桥面板与临时斜拉索在悬臂施工中形成悬臂桁架。

1995 年建成的贵州江界河大桥,为主跨 330m 上承式桁式组合拱桥。采用悬臂桁架法施工。拱圈(箱形截面)、拱上立柱(也称为竖杆)及斜拉杆均为预制构件,用人字拔杆吊运拼装,形成桁式组合拱。与上述国外两座桥不同的是,拱上斜拉杆为永久性构件,因为成桥后的结构体系为桁式组合拱,而不是一般的无铰拱。

跨径为 300m 及以上的钢筋混凝土上承式箱形拱桥如表 1-1 所列。

跨径 300m 及以上的上承式钢筋混凝土拱桥 表 1-1

序号	桥 名	主跨(m)	施 工 方 法	建 成 年 份
1	沪—昆高铁北盘江大桥	445	钢管混凝土劲性骨架法	在建
2	重庆万州长江大桥	420	钢管混凝土劲性骨架法	1998 年
3	昆—南高铁南盘江大桥	416	钢管混凝土劲性骨架法	在建
4	克罗地亚·克尔克大桥	390	悬臂桁架预制构件拼装法	1980 年
5	四川广元嘉陵江大桥	350	钢管混凝土劲性骨架法	2012 年
6	贵州江界河大桥	330	悬臂桁架拔杆吊装预制构件法	1995 年
7	陕西××县汉江大桥	330	钢管混凝土劲性骨架法	2012 年
8	美国·胡佛水坝大桥	323	斜拉扣挂挂篮悬臂浇筑法	2011 年
9	重庆梅溪河大桥	310	钢管混凝土劲性骨架法	在建
10	澳大地·Gladesville 大桥	304.8	钢拱架上现浇及拼装法	1964 年

- 注:①跨径≥300m 上承式 RC 拱桥,国外资料不全,可能有遗漏。
②除序号 1、3 两座桥为铁路大桥外,其余均为公路大桥。
③除江界河大桥为桁式组合拱桥外,其余均为一般箱形拱桥。

组合施工法的出现,是上承式混凝土拱桥施工技术的重要发展,它可以使大跨径拱桥根据桥位情况和孔跨布局有针对性地选择不同的施工方式组合,达到更经济合理与降低施工难度的目的,还促进了混凝土拱桥向更大的跨径发展。日本使用组合施工法最早,且技术成就突出。例如 1989 年建成的九州别府明矾桥,主跨 235m,主拱圈采用悬臂桁架现浇与劲性钢桁架现浇组合法(钢桁架埋入拱圈内)施工;日本宇佐川桥,为上承式不对称 RC 箱形无铰拱,1982 年建成,主跨 204m,拱圈采用悬臂斜拉挂篮现浇与劲性骨架现浇组合法施工;日本采用组合法施工的上承式混凝土拱桥较多,请参阅本书 5.6 节及附录 B。

以上是混凝土拱桥拱圈的主要施工工艺的发展情况。下面,我们再从更广泛的技术层面梳理一下拱桥的发展简况。

1708 年至 1794 年间,法国首先提出拱桥的压力线概念。这一重大的理论进展,使恒载压力线与拱轴线的相互关系及其对拱圈内力的影响逐步进入了拱桥的设计者的视野,奠定了现代拱桥设计理论的基础。

1890 年奥地利工程师米兰(J.Melan)发明了用劲性骨架作拱架、浇筑 RC 拱圈的工艺。这一工艺解决了一般拱架现浇混凝土圈难以解决的难题,使拱桥跨径首次超过 100m。1892 年,米兰获得奥匈帝国的专利,1900 年获得巴黎世界博览会金质奖章。用此法在欧洲和美国成功修建了多座大跨径混凝土拱桥。劲性骨架法已成当代混凝土拱桥重要的施工方法之一。

1911 年建成的意大利罗马复兴桥(主跨 100m,劲性骨架法),经过通车试验结果的分析研究,首次认识到了拱上结构与拱圈共同受力的重要现象。随着上承式混凝土拱桥设计施工的

发展,诞生了桥面加劲混凝土拱桥这一重要的结构形式。在当代的混凝土拱桥设计,也称为刚性梁柔性拱或倒朗格尔拱。根据拱与拱上结构的刚度对比关系,明确区分了刚性梁柔性拱、刚性拱柔性拱上结构和刚性梁柔性拱上结构的受力图式。首座真正意义上的刚性梁性拱桥为1930年建成的瑞士·萨尔基那山谷桥($L=90\text{m}$,镰刀形三铰拱)。

1941年建成的瑞士蓝格维斯桥(主跨 100m 铁路桥),第一次采用肋拱的结构形式,使拱的横截面型从单一的板拱发展为两种最基本形式。拱的设计有了更多的选择,在某些情况下,肋拱具有更多的优势。如2011年建成的美国胡佛水坝大桥(主跨 323m ,上承式RC无铰拱),通过认真比较后,选择了箱形截面双肋拱,为目前世界最大跨径上承式RC肋拱桥。

法国工程师尤金弗奈西奈(Eugene Freyssinet)设计的法国普卢加斯特大桥($3\times 171.7\text{m}$ 上承式RC箱形无铰拱),于1930年建成。施工中用28台液压千斤顶在拱顶处施顶调整拱圈内力与高度,获得成功。该桥首次将预加力概念与技术措施用到混凝土拱桥上,为大跨径混凝土拱桥设计主动调整拱体内力奠定了理论与实践基础。

1942年建成的捷克伏尔塔瓦河水库桥(主跨 150m 双铰RC拱),在大拱上叠加较大跨径的小拱,突破了拱上建筑传统的一般布局形式,为大跨径上承式混凝土拱桥美学设计树立了范例。

1956年意大利设计师设计的南非暴雨河桥(主跨 100m ,RC上承式拱),首次采用负角度(从上往下)竖向转体施工拱圈,且拱上立柱倾斜布置。

1963年建成的葡萄牙阿拉比达桥(主跨 270m 上承式混凝土肋拱),采用可横移的钢拱架施工。将肋拱与可横移钢拱架配合,大大提高钢拱架的使用效益,使钢拱架施工法的使用范围扩大了。

拱桥内力分析的弹性理论没有考虑水平力与拱的挠度相互作用产生的影响,当跨径较小且刚度较大时,按弹性理论计算拱的内力、挠度,基本上能满足工程设计的要求。1888年约瑟夫·米兰(J.Melan)正式提出荷载改变时对拱桥与悬索桥计算的挠度理论,为大跨拱桥以及刚度较小的拱桥的内力分析奠定了理论基础。

第 2 章 上承式混凝土拱桥施工方法分类

拱圈的结构设计与其施工方法密切相关,施工过程及运营阶段结构的应力应变受施工工艺的影响,而施工技术发展与创新,又推动着拱桥跨径的不断增大,所以,拱桥设计的合理性、可靠性、安全性、经济指标和施工工期在相当程度上受拱圈施工方法的影响。桥梁的跨径与桥型方案基本确定后,首先应该考虑与施工有关的主要问题,选用合理可行的施工方法,有时还可能因施工需要而局部调整跨径或桥型结构。

当代国内外修建上承式混凝土拱桥的施工方法,主要有以下 5 大类,如表 2-1 所列。

上承式混凝土拱桥施工方法分类 表 2-1

大 类		亚 类		次 亚 类	
一	拱架原位现浇(或拼装)法	1	落地式拱架法		
		2	悬拼钢拱架法		
二	转体施工法	1	平面转体法		
		2	竖向转体法		
		3	平、竖转组合法		
三	劲性骨架法	1	一般型钢骨架法		
		2	钢管混凝土骨架法		
四	悬臂施工法	1	塔架斜拉扣挂法	(1)	斜拉扣挂现浇(挂篮悬浇)法
				(2)	斜拉扣挂拼装(缆索吊装)法
		2	悬臂桁架法	(1)	悬臂桁架现浇法
				(2)	悬臂桁架拼装法
五	组合施工法				

2.1 落地支架现浇法

20 世纪 80 年代以前,多采用木支架,包括满堂木支架与三铰木拱或组合式木拱架。为了保护生态,节约木材资源,现已很少采用木支架,多采用钢支架,主要有两种基本形式,即满布式钢管支架(多用 $\phi 48 \times 3.5\text{mm}$ 小钢管)与临时墩上架设钢梁及钢拱盔。临时墩多采用大钢管(直径 $\geq 500\text{mm}$)或万能杆件组成,也有的采用浆砌块、片石。临时墩基础一般为扩大基础或桩基础。墩上纵梁多采用军用梁(如贝雷桁片或三角桁片)或型钢组拼。

采用落地支架现浇法施工的国内最大跨径上承式 RC 箱形拱桥,为河南许沟大桥,主跨 220m,于 2001 年建成。

1943 年建成的瑞典桑多桥,为上承式 RC 无铰拱桥,主跨 264m,在木桁拱架上现浇,是目前世界上用木拱架施工的最大跨径混凝土拱桥。

2.2 钢拱架现浇(拼装)法

当拱圈离地面较高或跨越河流、山谷时,以两岸拱座前方为拱架的拱脚;安装与拱圈跨径接近的钢拱架(拱架跨径小于拱圈跨径);在拱架上现浇或拼装混凝土拱圈。

大跨径拱桥的钢拱架,一般采用天线吊装。钢拱架纵向分段,用天线吊运,扣索斜拉扣挂,逐段悬拼合龙后形成拱架。当拱圈跨径在 150m 以下时,钢拱架的吊重,可以控制在 15t 以下,还可利用天线吊装拱上腹孔的装配式车道板。

钢拱架多采用型钢或贝雷桁片或三角桁片构成。为了能多次周转使用,国内一些施工企业,按定型设计图制作常备式钢拱架,能在一定的跨径和矢跨比的范围内通用。有的钢拱架为了适应地形、减小跨度,拱架顶面至拱圈下缘的距离较高,拱架之上还需用满布式小钢管支架形成拱盔。有的钢拱架顶面与拱圈下缘弧线之间(沿径向)为较小的等高空间,拱架之上可直接安装垫块及拱圈底模板,不需另外设置小钢管拱盔,拱架用料较省,且安装工作量较少。

采用钢拱架现浇法施工的国内最大跨径上承式 RC 箱形拱桥,为四川攀枝花 3007 大桥,主跨 170m,1983 年建成;1989 年建成的湖南五强溪水电站沅水大桥,主跨 133m,在钢拱架上拼装预制构件,形成箱形拱。1963 年建成的葡萄牙阿拉比达桥,主跨 270m,采用可以横移的钢拱架现浇箱肋。

2.3 转体施工法

转体施工法分为平面转体法、竖向转体法与平、竖转相结合的转体法三种形式。

平面转体法,将拱圈分为两个半跨,分别在两岸利用地形做简单支架预制拱箱,利用结构本身及临时结构组成扣锚体系,张拉扣索使拱箱脱架。拱箱、平衡重、转盘上盖及扣索组成转动体系(其重心通过转轴中心),借助预先设置的摩擦系数很小的环形滑道,用卷扬机或千斤顶牵引,将两岸的半跨拱箱平面转体至设计的桥轴线位置,然后进行拱顶合龙。

有平衡重的转体法是最常用的方法。在某些特殊情况下,也可以采用无平衡重平面转体法,无平衡重转体工艺由以下三个体系组成:

(1)锚固体系。由锚碇、尾索、平撑、锚梁及立柱组成。锚碇设于引道或边坡岩层中,锚梁支承于立柱上,两个方向的平撑及尾索形成三角形稳定机构,使上转轴为一确定的固定点。拱箱转至任一角度,则锚固体系平衡拱箱扣索力,从而可以省去有平衡重转动体系庞大的平衡圬工。

(2)转动体系。由上转轴、下转盘、拱箱及扣索组成。上转轴由埋于锚梁中的轴套、转轴和环套组成。扣索一端与环套相连,另一端与拱箱顶端连接。转轴套与环套间均可转动。下转盘为一马蹄形环环,马蹄形两端各有一走板,两个走板在固定的滑道上滑动。两走板上方各做一铰座,拱箱拱脚两侧各做一铰,支承于铰座上,马蹄转盘卡于下转轴外侧,下转盘与滑道、下转轴与环道之间均有摩擦系数很小的滑道板,可以转动。

(3)位控体系。上转轴与下转轴间设有一偏心值 e ,扣索张拉到设计吨位(T)后,拱箱离架,扣索力(T)产生一个向外的分力(F),即形成一个向外自转的力矩($M=T \cdot e$)。因此,必须在拱箱顶端用一缆风索将拱顶拉住。用一台卷扬机放缆风索,拱箱即可自动向外转体就位。

缆风索完全控制了拱箱转体速度与位置。

竖向转体施工,又分为从下往上提升转动的正角度竖转和从上往下降低转动的负角度竖转两种。

转体施工的上承式 RC 箱拱,绝大部分采用平转法,少数采用竖转法和平、竖转相结合的转体法。

桥梁转体施工工艺的详细内容可参阅文献[85]。

采用平面转体施工法施工的国内最大跨径上承式 RC 箱形拱桥,为福建行对岔大桥,主跨 205m,于 2008 年建成。

采用竖向转体法施工的最大跨径上承式 RC 拱桥,为德国阿根贝托贝尔桥,主跨 145m,于 1986 年建成,为负角度竖转。

2.4 劲性骨架法

沿拱圈轴线用型钢或钢管建成钢桁拱,以钢桁拱作为承力结构,在其上悬挂模板,分环、分段、分层对称、均衡地浇筑拱圈混凝土,最后合龙成拱。跨径较小时,可以采用型钢做劲性骨架。当跨径较大时,则采用钢管混凝土做劲性骨架。因此,在空钢管配合型钢形成劲性骨架钢桁拱之后,应先在钢管内灌注混凝土,使之成为钢管混凝土劲性骨架拱,然后再浇注拱圈混凝土。

20 世纪 90 年代以后,大跨径上承式 RC 拱桥,劲性骨架都采用钢管混凝土配合型钢做成钢管混凝土桁式拱。其中上、下弦杆为钢管,成拱之后,压入高强度混凝土,成为钢管混凝土结构。

钢桁拱骨架一般采用天线吊装沿纵向逐段拼接,扣索斜拉扣挂,在拱顶合龙。钢管内压注混凝土后,浇筑拱圈混凝土是这一工法最关键的施工阶段,随着混凝土的逐步施工加载,劲性骨架拱的内力与变形不断变化,当先期完成的混凝土拱环达到一定强度,实际上能参与劲性骨架拱联合承力,而这种钢—混凝土组合结构的内力也在不断变化。所以,这阶段施工过程的结构应力、应变及稳定特征值是很复杂的,涉及的因素较多,是结构设计、施工技术与施工监控的重点。也是劲性骨架法施工过程中风险最大的阶段。

在建的沪昆高铁贵州北盘江大桥,主跨 445m,将成为新的世界最大跨径混凝土拱桥。

2.5 悬臂施工法

根据悬臂施工过程的承力体系,可以分为斜拉扣挂法和悬臂桁架法两大类。

两种施工方法均可以用于拱圈原位现浇和拱圈预制构件拼装。上述悬臂施工法又可细分为以下 4 种:

- (1)斜拉扣挂现浇法(国内习惯称为挂篮悬浇法);
- (2)斜拉扣挂拼装法(国内习惯称为天线吊装法);
- (3)悬臂桁架现浇法;
- (4)悬臂桁架拼装法。

2.5.1 斜拉扣挂现浇法(挂篮悬浇法)

在桥梁墩、台处安装扣索索塔,用斜拉索一端扣住拱圈节段,另一端经过索塔进入锚碇区

锚固。在索塔与扣索系统形成后,安装挂篮,并浇筑拱箱节段混凝土,直到拱顶合龙。根据实际情况扣索与锚索也可以分别设置。扣、锚索采用低松弛钢绞线,千斤顶张拉。

挂篮悬浇法施工工艺,由以下3种体系构成:

(1)悬浇体系。主体结构为挂篮,包括桁架承重系统、行走系统、支反力系统、止推系统、工作平台及防护系统等6个部分。

(2)扣锚体系。由扣索、扣点、锚索、平衡索、锚点组成。包括扣索系统、锚固系统两大部分。通过扣塔与锚箱将两大部分结合成整体。

(3)锚碇体系。可根据实际情况,在满足安全的条件下,选择已有的墩台或天然地基作地锚。地锚形式有重力锚、隧道锚、群桩锚等。

采用挂篮悬浇法施工的国内最大跨径拱桥为四川攀枝花新密地大桥,主跨182m,于2013年建成。美国胡佛水坝大桥,主跨323m,为目前采用挂篮悬浇法施工的世界最大跨径上承式混凝土拱桥,于2011年建成。

2.5.2 斜拉扣挂拼装法(天线吊装法)

由于拱圈采用预制节段或构件在空中悬臂拼装,首先应解决预制构件由岸上预制场运至设计位置的问题,我国绝大多数情况下采用天线缆索吊运。因此,须在两岸合适位置设立天线索塔,也称为主塔。主塔上安装的主缆跨度须大于拱圈跨径,并方便吊运和安装全部拱箱节段。主塔高度应能确保拱顶节段的安装。拱箱节段就位后,须用扣索承力及定位,故需设置扣索索塔。较矮的扣索可以利用两岸墩台作扣点,高出墩台的扣索,应另外布置索塔(简称为扣塔)。扣塔与主塔可以分别布置,也可以主、扣塔合一。主塔因受力较大,承受前后两侧水平力不平衡差值,塔顶允许一定量的水平位移,故主塔脚应设计为铰接。扣索用以调整拱箱节段的准确位置并最后定位,故扣塔的水平位移须严格控制,扣塔脚应设计为固接。

我国从20世纪70年代初即成功应用天线吊装法修建上承式RC箱形拱桥,至今仍然是混凝土拱桥的主要施工方法之一,并积累了丰富的设计施工经验。尤其是1996年以后,施工中用“新工法”取代了“旧工法”,完成了一次重要的技术革新,使“天线吊装法”施工的上承式RC拱桥的跨径首次突破200m。

采用天线吊装法施工的国内最大跨径上承式RC箱形拱桥为福建宁德天池大桥,主跨205m,于2007年建成。

2.5.3 悬臂桁架现浇法

悬臂桁架现浇法的基本思路是:利用拱圈与拱上结构的永久性构件,以及临时设置的柔性斜拉杆形成桁架体系,将桥跨结构在全拱跨径范围内分为若干节段,从拱脚至拱顶逐节段施工,直至拱顶合龙。拱圈在施工过程中作为悬臂桁架的下弦,其轴向压力由拱座承担;桥面板在施工进程中作为悬臂桁架的上弦,通过墩台设置的拉索,将拉力传递至锚碇。

悬臂桁架现浇法,主要工序是:拱座完成后,安装挂篮,现浇第1节段的拱圈混凝土及本节段内的拱上立柱及桥面板,安装本节段的斜拉索,将桥面板中的水平拉索与墩台后面的锚索连接。现浇混凝土达到设计指定的强度后,第1节段的悬臂桁架形成。通过张拉斜拉索,可使拱圈高程达到监控的要求。挂篮移动至第2节段位置后,便可张拉第1节段的临时斜拉索,然后按同样方法施工第2节段悬臂桁架,直至拱顶合龙。