

高墩大跨连续 刚构桥

马保林 编著
李子青 主审



GAODUN DAKUA
LIANXU GANGGOUQIAO

—— 人民交通出版社 ——

Gaodun Dakua Lianxu Ganggouqiao

高墩大跨连续刚构桥

马保林 编著
李子青 主审

人民交通出版社

内 容 提 要

本书系统地论述了刚构桥及高墩大跨连续刚构桥设计的基本理论和方法、施工关键技术与挠度、应力施工监控等。内容包括:刚构桥概述、高墩大跨连续刚构桥及其桥型选择、稳定性分析、高墩刚度与风载对上部结构的影响、箱梁悬臂施工及挠度监控、箱梁应力计算及跟踪监控、桥梁静动载试验等。书中搜集了依托工程的大量实际数据,理论与实践相结合,便于读者学习参考。

本书可供从事桥梁工程科研、设计、施工、监理等技术人员阅读参考,也可作为高等院校土木工程学科桥梁工程专业教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

高墩大跨连续刚构桥 / 马保林编著. —北京: 人民交通出版社, 2001. 9

ISBN 7-114-04072-5

I. 高... II. 马... III. 刚构桥—桥梁工程
IV. U448.23

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 065849 号

高墩大跨连续刚构桥

马保林 编著

李子青 主审

责任校对:张莹 责任印制:张凯

人民交通出版社出版发行

(100013 北京和平里东街 10 号 010 64216602)

各地新华书店经销

北京凯通印刷厂印刷

开本:787×1092 $\frac{1}{16}$ 印张:12.75 字数:313 千

2001 年 10 月 第 1 版

2001 年 10 月 第 1 版 第 1 次印刷

印数:0001—4000 册 定价:25.00 元

ISBN 7-114-04072-5
U·02975

前 言

随着我国公路交通事业的迅猛发展,公路刚构桥特别是高墩大跨连续刚构桥已在桥梁工程领域得到推广和应用。为了使我国公路桥梁建设事业更快地发展,促使桥梁结构体系得以进一步完善,陕西科委立项“高墩大跨连续刚构桥应用研究”项目,取得了良好的经济效益和社会效益,笔者以此项目为基本素材编成此书,供从事桥梁工程科研、设计、施工、监理等技术人员阅读参考。该书亦可供高等院校桥梁工程专业师生教学参考。

“高墩大跨连续刚构桥应用研究”项目,由西安公路研究所主持,陕西省路桥总公司参与,参加课题研究的人员有:马保林、李乐洲、金泰丽、张充满、李玉幸、钟强、任金龙、陈贺清、张长江、朱邓文、田东等。

本书共分八章,第一、二、三、四、六、七由西安公路研究所马保林编写,第五章由西安公路研究所李乐洲和长安大学赵伟封编写,第八章由长安大学赵伟封编写。全书由马保林统稿,陕西省交通厅李子青教授主审。

本书在编写过程中得到了陕西省科委及陕西省交通厅领导,长安大学邬晓光,陕西省公路局袁雪戡,西安公路研究所金泰丽、王宏章,陕西省路桥总公司梁俊海、张充满,西安 618 研究所崔平如等同志的鼎力帮助和大力支持;李子青教授在百忙之中对本书进行了仔细审查并提出了许多宝贵意见,在此一并表示衷心的感谢!

希望本书能对桥梁工程教学、科研、设计、施工及监理工作有所帮助,但因高墩大跨连续刚构桥是刚架桥的一种创新,鉴于笔者水平所限,疏漏和错误在所难免,敬请读者批评指正。

马 保 林

2001 年 4 月于西安

目 录

第一章 概论	1
第一节 刚构桥的含义与特点	1
第二节 刚架桥的分类及构造特点	3
第三节 刚架桥设计及内力计算	7
第四节 刚架桥附加内力计算	8
第五节 刚构桥的施工	10
第二章 高墩大跨连续刚构桥	18
第一节 国内外发展状况	19
第二节 高墩大跨连续刚构桥的结构特点	27
第三节 该桥型需要研究的技术内容	49
第三章 高墩大跨连续刚构桥的桥型选择	50
第一节 概述	50
第二节 秦 202 线澄城西河大桥的桥型选择	51
第三节 国道 312 线亭口黑河大桥的桥型选择	52
第四节 乡(宁)—韩(城)黄河大桥桥型选择	53
第五节 三门峡黄河大桥的桥型选择	54
第六节 依托工程实体的简介	63
第四章 高墩连续刚构桥稳定性分析	65
第一节 桥梁的失稳及研究方法	66
第二节 高墩自体稳定性	69
第三节 上部结构施工阶段的稳定性	72
第四节 全桥稳定性分析	79
第五章 薄壁空心高墩的刚度、风载对上部结构的影响	83
第一节 概述	83
第二节 高墩刚度对上部结构的影响	84
第三节 风载对上部结构的影响	86
第六章 大跨度箱梁悬臂施工及挠度监控	108
第一节 概述	108
第二节 箱梁悬臂施工技术及设备	110
第三节 悬臂施工工艺及质量控制	123

第四节	挠度计算	142
第五节	误差模型	144
第六节	参数估计及挠度校正	146
第七节	后期挠度预报	149
第七章	箱梁应力计算及跟踪监控	150
第一节	箱形截面受力分析	150
第二节	温度应力计算及其受力特性	154
第三节	测点布置	158
第四节	施工阶段箱梁应力监控	159
第五节	主墩底、主跨跨中应力监控	162
第八章	桥梁静动载试验	164
第一节	概述	164
第二节	试验仪器	165
第三节	断面及测点布置	168
第四节	应力及挠度测定	169
第五节	动力特性分析	177
第六节	荷载试验结论	188
附录 1	线性最小方差估计	189
参考文献		195

第一章 概 论

桥梁是公路、铁路、城市道路和农村道路及水利建设中,为了跨越各种障碍(如河流、沟谷或其他线路)的结构物。桥梁在交通事业中占有举足轻重的地位。它不仅在公路总造价中占重要部分,而且是保证全线早日通车的关键。在国防上,桥梁是交通运输的咽喉,历来是兵家必争之地。在需要高度快速、机动灵活的现代战争中,它更占有非常重要的地位。

近几十年,由于我国科学技术的进步,工业水平的提高,桥梁建筑技术得以迅速发展。千里江面上的座座跨江大桥、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,城郊高速铁路桥与轻轨运输高架桥等,犹如一条条“彩虹”使得天堑变通途。并逐步建成立体交通网络,极大地改变了我国的交通状况,拉动了国民经济的发展,方便了广大人民群众的生活。在这些桥梁中不仅有华丽富贵的斜拉桥,气势雄伟的悬索桥,钢筋铁骨的钢桥,体形优美、历史悠久的拱桥,也有外表朴实却适应性强、施工方便、投资少、效益高的刚架桥、连续—刚构桥。

第一节 刚构桥的含义与特点

刚构桥是什么呢?我们可从其产生的历史中找到含义。传统的桥梁施工多用费时、费工的满堂支架法,这种方法对于中、小跨径的桥梁施工尚能适应,但对于大跨径及特大高度、水深较深的桥梁施工显然已不适应。1953年原联邦德国建成的沃伦姆斯桥(Worms),主跨114.2m,施工时引进了现在标志着钢桥传统施工方法的悬臂施工法,这种创造性的引进,基本解决了施工中的难题,而且更重要的是发展了预应力混凝土结构的一种新体系——T形刚构,并对其他体系桥梁产生了深远影响。而T形刚构因其独有的优点一经问世便得到了长足的应用和发展。1964年联邦德国又建成了主跨为208m的本道夫(Bendorf)桥,不仅再一次成功地显示出悬臂施工法的优越性,而且在结构上又有新的创新,薄型的主墩与上部连续梁固结,形成了带铰的连续刚构体系。70年代后,日本连续修建了类似的滨名、浦户大桥,目前T形刚构最大跨径已大于270m。80年代后,世界各国建造了多座不带铰的连续刚构体系,并发展了刚构体系的另一种形式连续刚构—连续体系,其中以1985年澳大利亚建成的主跨为260m的门道桥和挪威1998年底建成的主跨为298m的Raft Sundet桥最为著名。

从上面的建桥历史可以知道我们将要研究的连续刚构与T形刚构有着很深的渊源,也有人说T形刚构在构造上分为主跨跨中连续和设铰两种类型,亦可称为连续刚构—连续体系和连续刚构—铰接体系。那么刚构桥到底是哪一种桥梁体系呢?它有什么特点和优点呢?下面分别进行简单介绍。

一、桥梁体系

通常我们把桥梁结构按其受力特点分为梁、拱、刚架、吊与组合体系。预应力混凝土桥梁结构主要采用梁、拱、刚架和组合体系。

1. 梁式体系

梁式体系是以梁作为承重结构,以梁的抗弯能力来承受荷载。梁分简支梁、悬臂梁和连续梁。

2. 拱式体系

拱式体系以拱肋为主要承重结构,拱肋以承压为主,可采用抗压能力强的圬工材料来修建。因拱是有水平推力的结构,对地基要求较高,故一般修建于地基良好的地区。

3. 刚架式体系

刚架桥是介于梁与拱之间的一种结合体系。它是由受弯的上部梁(或板)结构与承压的下部柱(或墩)整体结合在一起。所谓整体结合是指梁与柱刚性连接。梁因柱的抗弯刚度而得到卸载作用。整个体系是压弯结构,也是有推力的结构。

4. 组合体系

组合体系是两种或两种以上的基本体系结合而成的受力体系,主要包括:

①由梁与刚架相结合的体系,如T形刚构、连续刚构。

②梁拱组合体系,如系杆拱、桁架拱、多跨拱梁结构等。

③斜拉桥,它是由承压的塔、受拉的索与承弯的梁组合在一起形成的一种结构体系。

墩梁固接是刚架桥的特点,不管是连续刚架—连续体系,还是连续刚架—铰接体系。T形刚构的墩梁是固接的,满足梁与刚架相结合的体系,应是一种梁与刚架相组合的组合体系。但其上部梁是主要承弯构件,虽然它们是墩梁固接,但因其墩梁之间的刚度相差很大,墩部基本不提供推力,其特性基本符合梁桥在垂直荷载作用下,支座只产生垂直反力无推力的特点。因此,也有许多学者将它们划归为预应力连续梁桥的一种。

二、刚构桥的特点

桥跨结构(主梁)和墩台整体相连的桥梁叫刚构桥。由于两者之间是刚性连接,在竖向荷载作用下,将在主梁端部产生负弯矩,因而将减少跨中正弯矩,跨中截面尺寸也相应减小。刚构桥在竖向荷载作用下,支柱将承受压力外,还承受弯矩。支柱一般也用混凝土构件做成,其在竖向荷载作用下,一般都产生水平推力。刚构桥大多做成超静定的结构形式,故混凝土收缩、温度变化、墩台不均匀沉陷和预应力等因素都会在结构中产生附加内力。在施工过程中,当结构体系发生转换时,徐变也会引起附加内力。有时,这些附加内力可占整个内力相当大的比例。

刚构桥的主要优点是:外型尺寸小,桥下净空大,桥下视野开阔。钢筋混凝土刚构桥混凝土用量少,但钢筋的用量较大,基础的造价也较高,所以,目前常用的是中小跨度;预应力混凝土刚构桥则常用于高墩大跨桥梁,且具有较好的技术经济性,其桥型方案主要采用连续刚构。

1. 连续刚构的优点

①其墩梁固结的特点省去了大跨连续梁的支座,无需进行巨型支座的设计、制造、养护和更换,节省昂贵的支座费用。

②因墩梁固结,桥墩的厚度大大减小,约为梁在支点处高度的0.2~0.4倍,比T形刚构的墩厚小得多,减少桥墩与基础工程的材料用量。

③抗震性能好,水平地震力可均摊给各个墩来承受,不需像连续梁设置制动墩承受,或采用价格较昂贵的专用抗震支座。

④墩梁固结便于采用悬臂施工方法,省去了连续梁施工在体系转换时采用的临时固结措

施。

2. 连续刚构—连续体系的主要特点

①一般要有两个以上主墩采用墩梁固结。要求主墩有一定柔度从而形成摆动支承体系,因此常在大跨高墩结构中采用。

②墩梁固结有利于悬臂施工,免除更换支座。

③在受力方面,上部结构仍为连续梁特点,但必须计入桥墩受力及混凝土收缩、徐变、温度变化引起的弹塑性变形对上部结构内力的影响,桥墩因需有一定柔度,所受弯矩有所减少,而在墩梁结合处仍有刚架性质。

④边跨桥墩较矮,相对刚度大时,为适应上部结构位移的需要,墩梁应做成铰接或设置支座。

⑤伸缩缝设置在连续梁的两端,可以置于桥台处,长桥也可设置在铰处。

3. 连续刚构—铰接体系的主要特点

①由于边跨连续可以加大主跨跨径,主跨选用变截面梁,适用于用悬臂施工法建造。

②主跨桥墩与梁刚接,桥墩具有一定刚度,桥梁具有连续梁和铰接T构的受力特性,因此,对桥梁基础要求要高一些。

③主跨中设剪力铰,满足结构水平位移的需要。

④为防止由于活载和附加力引起边墩支座的负反力,可采取压重措施或设置拉力支座。

⑤由于铰和梁的刚度差异引起结构变形不协调,因此桥面不平顺,导致行车不舒适。

第二节 刚架桥的分类及构造特点

一、刚架桥的分类

刚架桥可以是单跨或多跨结构,其主要类型有:门式刚架桥、斜腿刚架桥、“V”字墩身刚架桥、非连续刚架桥、连续刚架桥等。

1. 门式刚架桥

支柱做成直柱式的单跨刚架桥称为门式刚架桥,如图 1-1 所示。

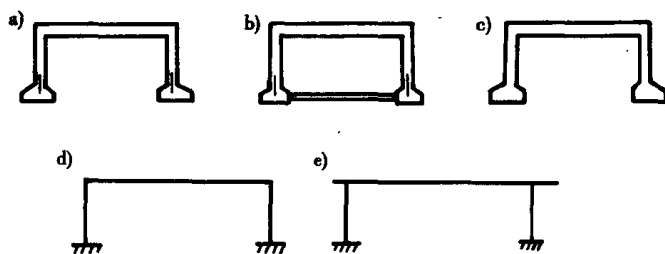


图 1-1 门式刚架桥

2. 斜腿刚架桥

支柱做成斜柱式的单跨刚架桥称为斜腿刚架桥,如图 1-2 所示。单跨刚架桥一般要产生较大的水平反力,为了抵消水平反力,可用拉杆连接两根支柱的底端,或做成封闭式刚架。门形刚架也可两端带有悬臂,这样可减小水平反力,改善基础受力状态。斜腿刚架桥的压力线和拱桥相近,故其所受的弯矩比门式刚架桥要小,主梁跨度缩短了,但支承反力有所增加,而且斜柱的长度也较大。



图 1-2 斜腿刚架桥

3. “V”字墩身刚架桥

将支柱做成“V”字墩形式,以减小斜腿肩部的负弯矩值的刚架桥称为“V”字墩身刚架桥,如图 1-3 所示。

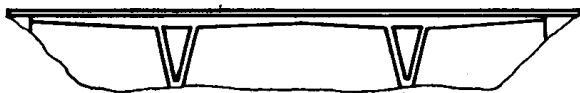


图 1-3 “V”字墩身刚架桥

4. 非连续刚架桥

在主梁跨中设铰或悬挂简支梁,形成所谓 T 形刚架或带挂梁的 T 形刚架称为非连续刚架桥,如图 1-4。

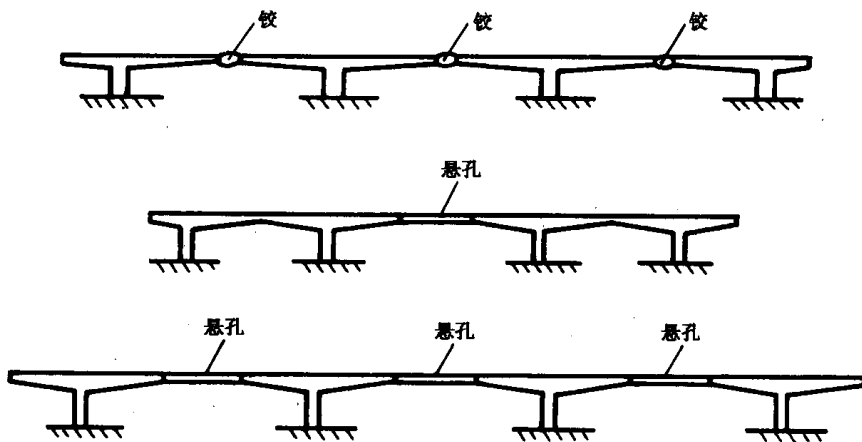


图 1-4 非连续式刚架桥

5. 连续刚架桥

主梁连续的多跨刚架桥称为连续刚架桥。当桥长太长时,宜设置伸缩缝,或做成数座分离式的连续主梁的刚架桥,如图 1-5、1-6 所示。



图 1-5 分离式多跨刚架桥

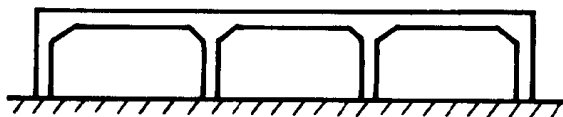


图 1-6 连续式多跨刚架桥

该桥型主要适用于城市高架桥。

二、刚架桥的构造

刚架桥的桥面构造和其它桥梁没有什么区别,由行车道铺装,排水防水系统、人行道(或安全带),缘石栏杆、护栏;照明灯具和伸缩缝等组成。

1. 主梁构造

主梁截面的形状与梁桥相同,可以有板、肋、箱梁等多种形式。主梁在纵方向上的变化可做成等截面、等高变截面和变高度三种。有时还可根据实际情况把主梁做成几种不同的截面形式,如图 1-7 所示,以适应内力的变化和方便施工。

2. 支柱构造

支柱有薄壁式和立柱式,如图 1-8 所示。

立柱式又可分为多柱式和单柱式。多柱式的柱顶通常用横梁相连,以承受侧向作用力。当立柱较高时,尚应在其中部用横撑将各柱连接起来。当桥梁很高时,为增加其横向刚度,可做成斜向立柱,支柱横截面可以做成实体矩形、工字形或箱形等。对于单柱式,其截面要与主梁截面相配合,腹板要尽可能与主梁腹板布置得一致,以利传力。

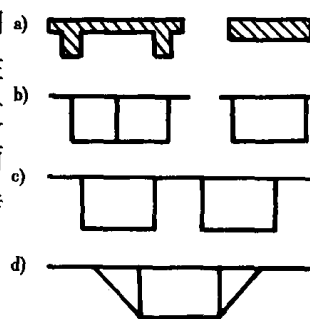


图 1-7 主梁截面形式

3. 节点构造

刚架桥的节点是指立柱与主梁相连接的地方,又称角隅节点,该节点必须具有强大的刚度,以保证主梁和立柱的刚性连接。隅节点

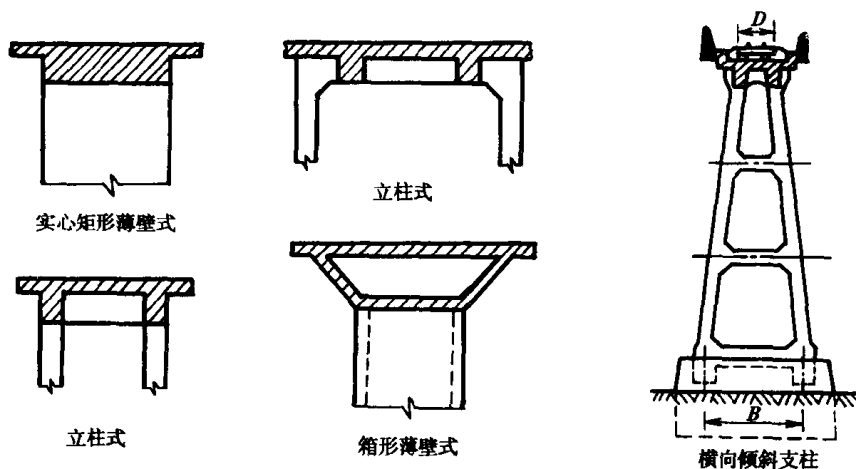


图 1-8 支柱形式

和主梁(或立柱)相连接的截面受有很大的负弯矩,因此在节点内缘,混凝土受有很高的压应力;节点外缘的拉应力由钢筋承担。压力和拉力形成一对强大的对角压力,对隅节点产生劈裂作用,减弱、消除劈裂作用常用的方法是加设梗腋。

对于板式刚架桥,可在节点内缘加设梗腋,以改善其受力情况;而且可以减少配筋,以利施工。隅节点的外缘钢筋必须连续绕过隅角之后加以锚固。

对于主梁为肋式的刚架,其隅节点可以如图 1-9 方法加设梗腋。

①仅在板面加设梗腋,如图 1-9 所示。

②仅在梁肋加设梗腋,如图 1-10 所示。

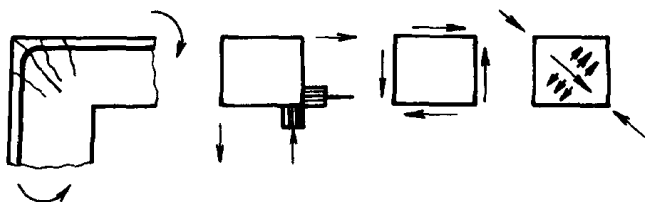


图 1-9 在板面加设梗腋

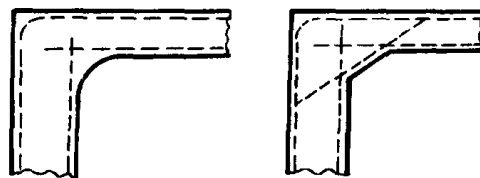


图 1-10 在梁肋加设梗腋

③梁、板都设梗腋,如图 1-11 所示。

必要时还可以在主梁底缘加设底板,使隅节点附近的主梁成为箱形截面。对于立柱也可照此办理,如图 1-12 所示。

当主梁和立柱都是箱形截面时,隅节点可做成如图 1-13 所示三种形式。

斜腿刚架桥的斜支柱与主梁相交的节点,根据截面形式的不同,可以制成图 1-14 所示的

两种形式。图 1-15 示出一种形式的预应力钢筋布置。

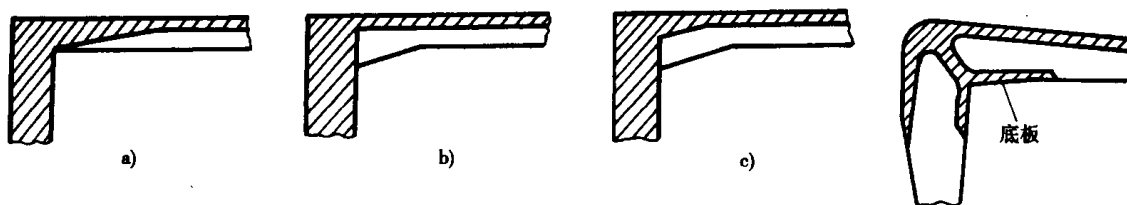


图 1-11 加梗腋的肋式主梁

a) 仅在箱形截面内设置斜隔板; b) 兼有竖隔板、平隔板; c) 兼有竖隔板、平隔板和斜隔板, 节点刚强, 布置主筋也较方便

图 1-12 主梁加设底板

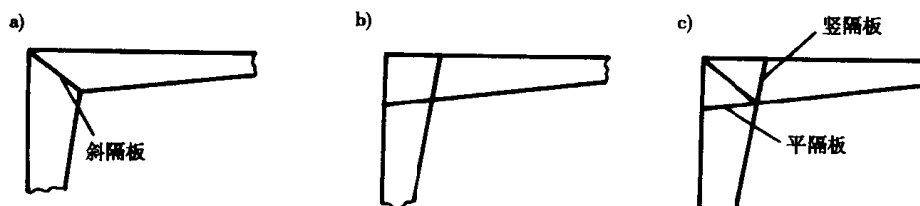


图 1-13 隅节点的三种形式

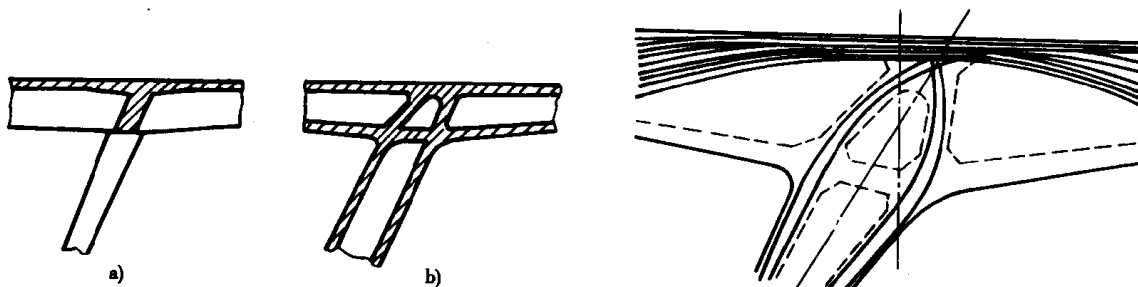


图 1-14 斜柱与主梁相交的节点形式

图 1-15 节点预应力钢筋

对于隅节点的配筋, 当采用普通钢筋混凝土时, 一定要有足够的连续钢筋绕过隅节点外缘 (图 1-16), 否则, 外缘混凝土由于受拉会产生裂缝。对于受力较大的节点, 在对角力的方向要设置受压钢筋, 在和对角力相垂直的方向要设置防劈钢筋。如果是预应力混凝土刚架桥, 与隅节点相邻截面的预应力钢筋宜贯穿隅节点, 并在隅角内交叉锚固在梁顶和端头上。预应力钢筋锚头下面的局部应力区段内需设置箍筋或钢筋网, 用以承受局部拉应力。

4. 铰支座

刚架桥的铰支座, 按所用材料分为: 铅板铰、钢铰和混凝土铰。

铅板铰就是在支柱底面与基础顶面之间垫铅板, 中设销钉, 销钉的上半截伸入柱内, 下半截伸入基础, 利用铅材容易产生变形的特点, 形成铰的转动作用, 如图 1-17 所示。

钢铰支座一般为铸钢制成, 其构造与梁桥固定支座和拱桥支座相同。

混凝土铰 (如图 1-18) 是在需要设置铰的位置将混凝土截面骤然减小, 使截面刚度大大减小, 因而该处的抗弯能力很低, 可产生结构所需要的转动, 这样就形成铰的作用。由于截面的骤然颈缩, 压力流受到挤缩如图 1-19, 因此相应地产生横向压力。该横向压力对铰颈混凝土起一套箍作用, 使混凝土处于多轴受压状态, 从而大大提高了铰颈混凝土的抗压强度, 故此铰颈截面的尺寸可以很小却能承受高的压力。小的铰颈截面尺寸显然对铰的转动有利。

混凝土铰是一个简单便宜的允许产生转角的构造形式。它不怕锈蚀, 长期不需要养护, 节

约金属材料;缺点是转动性能或多或少受到约束,转角较大时会在铰截面产生裂缝。

混凝土铰可分为线形铰和圆形铰。线形铰的铰颈截面为矩形(如图 1-20a),仅绕其长轴方向转动;圆形铰,其铰颈截面为圆形(如图 1-20b),可在任意方向产生转动,故能适用于斜交桥。

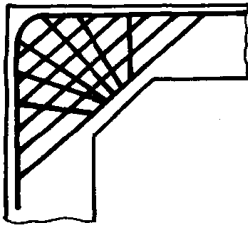


图 1-16 隅节点钢筋的设置

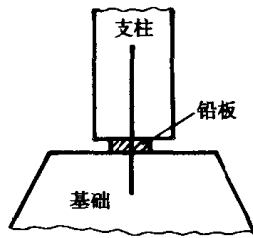


图 1-17 铅板铰筒图

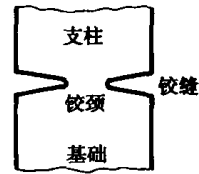


图 1-18 混凝土铰筒图

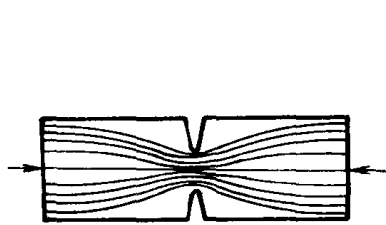


图 1-19 混凝土铰压力流线

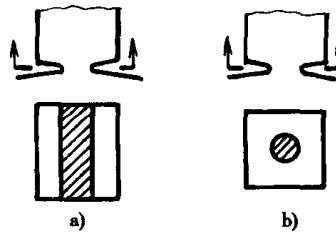


图 1-20 混凝土铰的类型

第三节 刚架桥设计及内力计算

一、钢架桥的主要尺寸

刚架桥的主要尺寸包括主梁跨度和高度、支栓高度以及桥的横向宽度,这些尺寸决定主梁和支柱的刚度及两者的比例。主梁与支柱的刚度比又决定了刚架的内力分布。当主梁和支柱的刚度比很大时,也就是支柱相对很柔时支柱承担弯矩很小,主梁端部负弯矩很小,跨中正弯矩很大,趋于设支座梁受力情况;反之,若此刚度比很小则主梁弯矩增大,正弯矩减小,趋于固端梁受力情况。显然,刚度比还影响到基础的水平推力和次内力的大小。同时主梁和支柱尺寸的确定还应保证结构的变形不超过容许值。

1. 主梁尺寸

①主梁的跨度:刚架桥两端悬臂长为中跨跨度的 0.2~0.5 倍。悬臂加长,端支柱弯矩可减小,跨中正弯矩也可减小,但主梁弯矩变化较大。三跨连续刚架桥,边跨一般为中跨的 0.7 倍或相等,个别在预应力混凝土刚架桥中,边跨可仅为中跨的 0.5 倍左右。

②主梁高度:在大跨度预应力混凝土刚架桥中,主梁高度为其跨度的 $1/30 \sim 1/40$ 左右,当采用变高度梁时,端部梁高为跨中梁高的 1.2~2.5 倍,甚至更高。

2. 支柱或墩身尺寸

①墩柱高度主要由桥梁建筑高度、桥下净空高度、端部梁厚度等决定,斜柱的倾斜角一般在 $40^\circ \sim 60^\circ$ 之间。

②墩柱纵向的厚度可采用其高度的 $1/8 \sim 1/15$,支柱较高时用较小的比值,较矮时则用较大的比值。

③墩柱横桥向尺寸要求和立梁相配合,并考虑桥的横向刚度和稳定性。

3. 桥梁横向宽度

刚架桥横向宽度应根据道路等级、使用功能、主梁的截面形式等确定。

二、刚架桥设计

1. 内力计算原则及假定

目前,超静定体系桥梁的内力,仍按在运营荷载作用下,结构处于弹性工作阶段的假定进行计算。计算刚架内力时,可遵循以下原则和假定:

- (1)取支柱厚度的中分线和平分主梁跨中截面高度的水平线作为计算各式的理论轴线;
- (2)厚度变化较大的刚架桥则以各截面高度中分点的连线作为计算各式的理论轴线;
- (3)计算截面包括全部混凝土截面(包括全拉区),不考虑钢筋;对于 T 形和箱形截面,不论其顶板和底板多厚,均应全部记入计算截面;
- (4)计算变位时,一般可略去轴向力和剪力,仅计弯矩的影响;但在计算张拉力作用所产生的次内力时,必须计入轴向力对位移的影响;
- (5)当采用变截面的主梁和支柱时,如果在同一构件中最大截面惯性矩超过最小截面惯性矩的 2 倍时,则应考虑此项变化的影响;
- (6)在主梁与支柱相连接的区域,其截面惯性矩与其它地方相比要大得多,有时可看作趋于无穷大,此区域的变形实际上非常小,因此,在计算内力时可不考虑此区域变形的影响;
- (7)当刚架莫基于压缩变形很小的土壤中时,支座底端可认为是固定的;若刚架莫基于中等坚实的土壤时,则仅在下列情况下可认为是固定的:由于基础有足够大的尺寸,致使基础底面一边的土压应力与另一边之比不大于 3 时;
- (8)关于混凝土的弹性模量,根据现行规范规定,截面刚度按 EI 计,其中惯性矩 I 的计算规定如下:对于静定结构不计混凝土受拉区,计入钢筋;对于超静定结构包括全部混凝土截面,不计钢筋。

2. 竖向荷载作用下的内力计算

有关刚架桥在竖向荷载作用下的内力计算(包括变截面门式刚架桥、斜腿刚架桥),可参阅有关的结构力学书籍或用现有的电算程序解决,目前一般按平面结构计算,也可按空间结构进行分析,在此不再赘述。

第四节 刚架桥附加内力计算

一、混凝土收缩附加内力计算

目前《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTJ 023—85)对收缩的计算无明确的规定。“铁路规范”规定:对于钢筋混凝土桥,按温度降低 $15^{\circ}\text{C} \sim 20^{\circ}\text{C}$ 来计算收缩变形所产生的次内力,计算收缩率的终极值为:

$$\epsilon_{sk} = \alpha t = 15 \times 10^{-5} \sim 20 \times 10^{-5} \quad (1-1)$$

混凝土收缩相对变形的变化规律为:

$$\epsilon_{st} = \epsilon_{sk}(1 - e^{-pt}) \quad (1-2)$$

式中: p ——收缩时间增长速度的系数;

t ——混凝土硬化时到计算收缩变形时的时间。

混凝土收缩引起的水平方向附加内力为：

$$R = -\Delta_{RS}/\delta_{ss} \quad (1-3)$$

对斜腿刚架,尚应计算斜支柱的收缩所引起的位移。每一斜支柱收缩所产生的水平位移为：

$$\Delta_{RS}^c = \int_0^s \epsilon_s^c \cos \theta ds \quad (1-4)$$

总位移为：

$$\Delta_{RS} = \Delta_{RS}^b + 2\Delta_{RS}^c = \int_0^1 \epsilon_s^b ds + 2 \int_0^s \epsilon_s^c \cos \theta ds \quad (1-5)$$

二、混凝土徐变所产生的次内力计算

当体系发生转换时,混凝土徐变才引起内力的变化并由徐变产生次内力。

若主梁为整体预制,架设到支柱上,然后再把梁柱接头整体化,体系因而发生了转换,由于自重应力所产生的徐变将引起刚架内力重新分布,其徐变次内力计算式如下：

$$M_A = -\frac{\theta_{ab}^0}{\theta_0^0 + \theta_{ac}^0} [1 - e^{-(\varphi_t - \varphi_\tau)}] \quad (1-6)$$

式中： θ_0^0 ——刚架主梁安装就位后的梁端弹性转角；

θ_{ab}^0 ——主梁两端作用单位力矩时所产生的梁端转角；

θ_{ac}^0 ——柱顶作用单位力矩所产生的柱顶端转角；

φ_t ——混凝土的龄期为 t 时的徐变系数；

φ_τ ——将简支梁两端固着时,混凝土的龄期为 τ 时的徐变系数。

若主梁和支柱为预应力混凝土构件,在梁柱整体化之前,已经张拉一部分钢筋,预应力产生的梁端和柱顶端弹性转角为 θ_{yab}^0 和 θ_{yac}^0 ,则对应于徐变所产生的主梁梁端弯矩为：

$$M_a = (M^0 + HR^0)[1 - e^{-(\varphi_t - \varphi_\tau)}] \quad (1-7)$$

式中：

$$R^0 = -\frac{\Delta_0^0}{\delta_{ab}^0 + \delta_{RR}^0}$$

三、温度变化所产生的附加压力计算

温度变化对结构的影响是复杂的,因为：①温度变化本身是某种周期性的变化；②不同的材料,不同尺寸的构件,不同部位的构件对温度变化的反应不同；③温度变化影响往往伴随着混凝土的收缩和徐变,两者相互联系。在设计超静定结构的混凝土桥时,一般采用近似简化的计算方法考虑温度变化产生的附加内力的影响。

对钢筋混凝土构件,外界气温一般取一月份的平均温度作为最低气温,取七月份的平均气温作为最高气温。

温度变化的变形为：

$$\Delta_{RT} = (t - t_0)\alpha \int N_R dt = (t - t_0)\alpha L \quad (1-8)$$

式中： α ——混凝土和钢筋混凝土的线膨胀系数,可取 $\alpha = 1 \times 10^{-5}$ ；

L ——主梁的长度。

四、预应力作用所产生附加内力计算

对于超静定的刚架桥,预应力的作用将引起附加内力。当主梁承受预应力、偏心弯矩时,均引起向外的水平反力,起着抵消预应力的作用。而支柱承受预应力偏心弯矩作用时在支承处会引起水平反力。一般说,主梁构件较长,所受张拉力较大,因此产生的反力较大,而支柱预应力的影响较小。所以此项内力主要来自主梁预应力的影响。

由预应力引起的附加反力:

$$R = \Delta_{RY} / \delta_{RR} \quad (1-9)$$

式中: Δ_{RY} ——是预应力作用时,刚架基本体系沿水平反力方向的变位,其计算公式为:

$$\Delta_{RY} = \int \frac{\overline{M}_R}{EI} \overline{M}_Y ds + \int \frac{\overline{N}}{EA} \overline{N}_Y ds \quad (1-10)$$

预应力作用所产生的附加内力,可以通过调整预应力钢筋的位置,或者通过调整支点反力来消减。

五、墩台不均匀沉降引起的附加内力计算

墩台基础沉降与地基土壤的物理特性有关,一般也是随时间而递增的,经过相当长的时间,接近沉降终值。假定沉降变化规律相似于徐变变化规律,在应用有效弹性模量法,其方法方程为:

$$\delta_{11}(x_{1t} + x_{1d}) + \Delta = 0 \quad (1-11)$$

$$R = -\Delta_{RY} / \delta_{RR}$$

式中: x_{1d} ——墩台沉降在 T 时刻的变形值引起的基本结构赘余力方向的弹性内力;

Δ ——墩台沉降在 T 时刻变形值导致基本结构赘余力方向上的变位。

第五节 刚构桥的施工

桥梁施工技术的发展对桥梁的跨径、线形、截面形式等方面起着重要作用。初期的混凝土连续桥梁采用搭设支架就地浇筑的施工,桥梁跨径多为 30~40m。由于施工工期长,并耗用大量木材,因而建造连续梁数量很少。60 年代初期,悬臂施工方法从钢桥引入预应力混凝土桥后,使预应力桥得到了迅速发展。刚架桥则从传统的支架施工法发展成现在广泛应用的悬臂施工法。

一、支架施工法

即在支架上就地浇筑混凝土的施工方法,施工时需要大量脚手架,施工期长,以往多用于桥墩较低的桥梁施工中,其中机具和起重能力要求低。对预应力混凝土连续梁桥来说,结构在施工中出现体系转换的问题,引起恒载徐变二次力。近年来,随着钢脚手架的应用和支架构件趋于标准化,以及桥梁结构的多样化发展,如变宽桥和强大预应力系统的应用,在长大跨桥梁采用就地浇筑施工也是一种经济有效的施工方法。

1. 支架的形式

支架按其构造可分为支柱式、梁式、梁支式。

- (1) 支柱式:用于陆地式不通航河道以及桥墩不高的小跨桥。
- (2) 梁式:梁可支承在桥墩旁的支架,或在桥墩上预留托架或支承在墩处横梁上。
- (3) 梁支式:在大跨桥上使用,梁支承在桥墩台上以及临时支架上,形成多跨连续支架。

2. 对支架的要求

(1) 支架虽是临时结构,但它要承受桥梁的大部分恒重,因此必须有足够的强度、刚度,以保证就地浇注的顺利进行。支架的基础要可靠,构件要结合紧密并加设横向、纵向连接杆件,使支架成为整体。

(2) 在河道中施工的支架要充分考虑洪水和漂浮物的影响,除对支架的结构构造有所要求外,应尽量避免在高水位情况下施工。

(3) 支架在受荷后有变形和挠度,在安装前要有充分的估计和计算。

(4) 支架的卸落设备有木楔、砂筒和千斤顶等数种,卸架时要对称、均匀,不应使主梁发生局部受力状态。

3. 支架施工特点

有支架就地浇注施工需要采用一联几跨同时搭设支架,按照一定的程序完成浇注工作,待张拉预应力筋、压浆后移架。浇注混凝土时采用水平层施工法,先浇注底板混凝土,待其达到一定强度后进行腹板施工,最后浇注顶板。另一种分段施工法也很常用。即根据施工能力每隔 20~25m 设置连接缝,该连接缝一般设置在弯矩较小的区域,接缝长 1m 左右,待各段混凝土浇筑完成后,最后在接缝处施工合拢。此法支架早期变形不致引起梁的开裂,有利于提高梁体质量。

二、悬臂施工法

该法用于建造预应力混凝土桥,是 1950 年由前联邦德国首创。它利用已建成的桥墩沿桥跨径方向逐段地悬出接长对称施工,因此采用悬臂施工的必要条件是:施工中桥墩与梁固结;施工中桥墩要承受不对称弯矩。悬臂施工时随梁段增加即悬臂长度的增长,梁内出现的负弯矩不断增大,对混凝土桥必须在梁段上缘施加预应力,使其完成的梁段连成整体。其施工特点是:桥下不需搭设支架,对在深水、大跨、通航、峡谷、高墩的条件下建桥是最优的施工方案;工序较简单,施工设备较少;多孔桥可平行作业,施工速度快;悬臂施工使跨中正弯矩转移到支点负弯矩,大大提高了桥梁的跨越能力;节省施工费用,降低工程造价。该方法 40 多年来得到蓬勃发展,由早期应用于 T 形刚架桥,后来又被推广用于悬臂梁桥、连续桥梁、连续刚架桥、斜拉桥和拱桥等。被推广应用的桥型采用悬臂施工时,一般存在施工中的受力体系转换问题,因此施工中应及时调整所施加的预应力来适应这一转换,并消除因体系转换及其它因素引起的次内力。

在连续刚构桥悬臂施工时,结构的受力体系为 T 形刚构悬臂梁,待施工合拢后形成连续刚构。因此,在桥梁设计中要考虑施工过程中的受力状态;要考虑由于体系转换及其它因素引起的附加内力。而且为使施工受力与运营状态结构受力吻合,通常选取变截面梁。预应力混凝土刚构桥在悬臂施工时由于墩不能完全承受弯曲力,施工时要采取措施增加墩身刚度,待悬臂施工合拢后恢复原结构状态。

悬臂施工是由两个相邻的桥墩同时向两侧分段进行,水平推进,直到跨中合拢,各梁段用预应力紧密连成整体。它通常分为悬臂浇筑和悬臂拼装两类。