

圆弧拱渡槽设计与计算

武博庆 编著



天津出版传媒集团

 天津科学技术出版社

圆弧拱渡槽设计与计算

主 审 李木山

编 著 武博庆

参 编 张祖兴 刘江侠 刘淑红

朱晓春 邢 斌 毛慧慧 宋秋波

天津出版传媒集团

天津科学技术出版社

图书在版编目(CIP)数据

圆弧拱渡槽设计与计算/武博庆编著. —天津:天津科学技术出版社,2012.8

ISBN 978-7-5308-6982-6

I .①圆… II .①武… III. ①渡槽-设计②渡槽-工程计算 IV.①TV672

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 169298 号

责任编辑:王 祯

责任印制:张军利

天津出版传媒集团

 天津科学技术出版社出版

出版人:蔡颢

天津市西康路 35 号 邮编 300051

电话(022)23332400(编辑部) 23332393(发行部)

网址:www.tjkjcs.com.cn

新华书店经销

天津市云海科贸开发公司印刷

开本 787×1092 1/16 印张 19.25 插页 2 字数 400 000

2012 年 8 月第 1 版第 1 次印刷

定价:48.00 元

作者简介

武博庆,1939年生,河北廊坊人。1957年毕业于河北工程技术高等专科学校,并分配至河北省张家口地区水利局。1982年调水利部海河水利委员会。1995年兼职香港新华通讯出版社技术顾问、香港新闻出版社技术顾问。1996年兼职天津大学副教授、硕导。1998年退休后受聘中水资产评估有限公司首席专家,水利部稽察办公室前期设计工作专家,以及水利部松辽水利委员会、哈尔滨市水利规划设计研究院、黑龙江省水利规划勘测设计研究院、广西壮族自治区水利勘测设计研究院、水利部海委科技咨询中心、中同华资产评估有限公司等数单位项目专家至今。50多年里,一直从事水利规划、设计、施工、科研及专项业务工作,涉及水文、泥沙、水工结构、抽水泵站、水电站、水利经济、工程后评价、资产评估等领域,发表论著27篇(册)。获水利部科技进步奖2次,国家科委科技进步奖1次,联合国发明创新科技之星奖1次。本书以三、四十年前亲自设计、施工的30多座拱渡槽、拱桥和6座双曲拱坝的工作积累及这些工程的运用资料为实践依据,并融入近年工作感受与研究成果编写而成。

序 (一)

在拱渡槽、拱桥等垂直承重拱结构中,圆弧拱有易于放样施工的突出优点。但以往在大跨径拱渡槽中,都采用悬链线拱轴线,不采用圆弧拱轴线,使圆弧拱的突出优点不能充分发挥。武博庆同志为了扩大圆弧拱的应用,早自 20 世纪 60 年代起,就开始拱渡槽的研究,曾设计、建造圆弧拱渡槽、拱桥 30 余座。这些工程已应用至今。现在,武博庆同志依据这些工程的长期积累和几十年的理论研究,编写了本书,从理论和实践上,全面系统地给出了各种圆弧拱渡槽的设计计算方法,不仅圆满地解决了圆弧拱在大跨径工程中的应用,而且指出了悬链线拱在空腹拱条件下可能存在的不足,还指出了拱渡槽工程中普遍存在的轴线偏离现象及其附加内力计算方法。本书内容丰富,观点鲜明,立论准确,基本公式推导详细,实用性强,具有学术价值,可作为设计、教学、科研工作参考。为了便于在计算机上设计计算,本书还提供了准确的基本公式和参数选择依据。

武博庆同志长期从事水利规划、设计、施工和管理工作的实际工作经验和扎实的理论知识。在 20 世纪 90 年代,在与天津大学水利系季云教授合作开展一些课题研究和兼职我校副教授、硕士研究生导师期间,曾主持完成《北方中小城市供水效益计算方法与参数研究》和《引滦工程(项目群)后评价报告》两项成果,先后获水利部科技进步奖、国家科委科技进步奖、联合国发明创新科技之星奖,对我国水利科技做出了贡献。相信这部《圆弧拱渡槽设计与计算》也将对我国水利事业的发展产生较大影响。

天津大学 

2012 年 3 月 8 日

序 (二)

我与武博庆同志相识于 20 世纪 70 年代。那时,清华大学到河北省张家口地区开门办学。其间,我参观了武博庆同志设计建造的许多双曲拱渡槽,其中规模最大和跨径最大的正在施工,便请武博庆同志结合现场讲了关于双曲拱渡槽设计施工方面的课。后来,武博庆同志撰写了《等截面圆弧无铰拱渡槽计算新方法》和《等截面圆弧无铰空腹拱的恒载计算》两部著作。我应水利电力出版社水利编辑室和《水利水电技术》编辑部的委托,于 1978 年 3 月 18 日写了审阅意见,肯定了著作观点和具有特色的计算公式,并建议出单行本或编入手册。之后,编辑部又请大连工学院钱令希教授、水电部水利水电规划设计管理局潘家铮总工程师先后审阅,将主要内容分别发表于《水利水电技术》1978 年第 3 期、1979 年第 5 期。

我与武博庆同志交往不深,但对他有较深印象,当时就觉得他是一位勤于工作并勇于探索的青年工程师。现在,武博庆同志在 40 年前所做工程的设计实践和应用资料的基础上,又融入数年理论研究成果,编写了这本《圆弧拱渡槽设计与计算》专著,全面系统地阐述了各种圆弧拱渡槽的设计理论与计算方法。我认为这本著作最重要的意义在于论证了圆弧拱的应用绝不局限于小跨度渡槽,在中、大跨度渡槽上,圆弧拱不但可用,甚至可能优于其他轴线的拱。在圆弧拱理论方面,作者还提出了拱渡槽设计中需要进行工况选择和普遍存在于拱渡槽工程中的轴线偏离现象,并给出其附加内力的计算方法。此外,书中还附有大量数表,具有很强的实用性,可供设计、教学、科研等有关人士参考。相信本书会在我国水利建设事业和水利科技发展中发挥一定的作用。

清华大学 李著琛

2012 年 3 月 18 日

序 (三)

拱渡槽是水利建筑物中典型的垂直承重拱结构,这种结构的拱轴线设计,关系到结构的受力、施工和投资,因此在设计中应采用受力状态好又便于施工的拱轴线。但是,长期以来在实际工程中,易于施工的圆弧拱却只被用于小跨径拱,而施工放线较难的悬链线拱却被大量用于大、中跨径拱。圆弧拱易于施工且造价相对较低的优势发挥不出来。

为了改善这种状况,扩大圆弧拱的应用,使圆弧拱也用于大、中跨径,武博庆高级工程师通过大量研究,发现这种状况与以往文献所给出的设计计算方法有关。首先,在拱轴线设计方面,设计人员需依据拱轴线的理论荷载去布置、计算和调整拱上结构,使拱上结构施加于拱圈上的作用力所形成的荷载压力线吻合于拱轴线,从而使拱圈处于无拉应力的理想受力状态。但是,以往文献未能给出圆弧拱的理论荷载,圆弧拱不能按上述合理拱轴线原理去进行设计计算,使得圆弧拱的应用受到限制。其次,在拱圈内力计算方面,拱渡槽通常采用无铰拱,而无铰拱属于三次超静定结构,拱圈内力计算理论方法甚繁,设计人员一般需依照相关文献所给实用公式和数表才能进行计算。但以往文献却未给出圆弧无铰空腹拱实用内力的公式和数表,因而也就无法采用较大跨度的圆弧无铰空腹拱。因此圆弧拱设计上存在着“圆弧拱理论荷载”与“圆弧无铰空腹拱内力计算方法”两大难题。面对这些难题,武博庆同志于1968—1980年结合当时的设计任务,开展了十多年的探索,设计建造了圆弧无铰空腹拱渡槽、拱桥30余座,其中最大渡槽净跨54 m,设计流量为 $20 \text{ m}^3/\text{s}$;最大的拱桥净跨40 m,设计通车能力为汽13级。这些工程已经运用了30多年,实践证明圆弧拱可以用于大中、跨径。

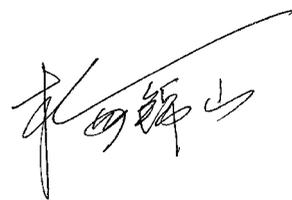
武博庆同志通过大量工程的设计、建造和运行情况的积累,编著了这本《圆弧拱渡槽设计与计算》。本书系统地阐述与揭示了圆弧拱渡槽设计计算的理论与实用方法,观点鲜明,立论准确,以数表多、算例多、实用性强为主要特点,兼

有理论研究价值。我与武博庆同志相识于1982年,曾同在水利部海河水利委员会规划设计处工作。在与他相处的日子里,我体会到他是一位刻苦、敬业、严谨、务实、勤于思考、勇于创新的人。现在,他经40年的探索、实践、思考、总结,终于写出了这部专著。我深感钦佩和崇敬。

这部专著不仅解决了“圆弧拱理论荷载”和“圆弧无铰空腹拱内力计算方法”两大难题,填补了圆弧拱渡槽设计计算方法中的空白,而且首次提出了必然存在于拱渡槽工程中的轴线偏离附加内力问题,并给出了相应的理论计算方法和实用计算方法。这一点,具有更为重要的实用价值和理论价值。相信本书必会对推动我国拱渡槽技术的发展发挥较大作用。

谨此为序。

水利部规划设计总院

A handwritten signature in black ink, appearing to read '李相山' (Li Xiangshan), written in a cursive style. The signature is positioned to the right of the text '水利部规划设计总院'.

2012年3月4日

前 言

拱渡槽是一种常见的输水建筑物。多年来,拱渡槽的设计计算常采用公路拱桥法。但是,在以公路拱桥法设计计算拱渡槽时,有三个问题需要研究解决。一是该法所称圆弧拱只用于小跨径,不宜用于较大跨径;二是该法未给出圆弧空腹拱的计算方法,不能设计计算圆弧空腹拱;三是该法未提及轴线偏离附加内力,不满足拱渡槽设计中必须考虑轴线偏离附加内力影响的计算需要。

为了研究解决这些问题,笔者在 1968—1980 年,曾结合设计工作开展了大约十多年的探索,边研究、边积累、边应用实践,共设计建造了较大跨径圆弧无铰空腹拱渡槽、拱桥 30 余座。其中,最大的渡槽,净跨 54 米,设计流量 20 立方米/秒;最大的拱桥,净跨 40 米,设计活载为汽 13 级。根据工作积累和体会,笔者就圆弧拱可以用于大跨径的问题,分别于《水利水电技术》(1978 年第 3 期、1979 年第 5 期)和《海河科技》(1982 年第 4 期)发表了部分成果论文。

建于 20 世纪 60 年代至 80 年代的这些工程,除个别因规划、地震等原因而停用或改建外,目前大部分仍在运行。这些工程不仅发挥了设计输水作用,而且积累了宝贵的运行资料。笔者三四十年的设计与建造实践,全过程地证明了一个结论:以往圆弧拱只用于小跨径,而不用于较大跨径,并不是圆弧拱本身的问题,而是没有按照圆弧拱的特定荷载规律来设计与调整拱上荷载,同时也没有形成大、中跨径圆弧空腹拱计算方法的缘故。如果按照圆弧拱的荷载规律和计算方法设计计算圆弧拱,那么施工简易的圆弧拱就可以用于大、中跨径,并能取得较好或理想的受力效果。所以,笔者在这些工程建成几十年后的今天,以这些工程及同期设计建造于河北省宣化、怀安、张北、怀来等县的海儿洼、常峪口、水沟口二库、水口山、十大股、张家湾等 6 座双曲拱坝工程的积累为基础,再融入系统的数

学推导、分析论证、实用数表以及近年来在水利部稽察工作中的研究体会来编写本书,试图通过本书对我国拱渡槽设计技术的进一步完善与发展,特别是大跨径圆弧空腹拱的扩大应用发挥一定的作用。

本书基于拱力学的基本理论和设计实践,系统推导给出了各类圆弧拱渡槽的设计计算理论方法与实用方法。在圆弧拱荷载变化规律、圆弧无铰空腹拱内力计算、拱渡槽轴线偏离附加内力计算等三个方面填补了以往的技术空白。考虑到实用性,本书还给出了大量数表及附录。

本书共 8 章,张祖兴同志参加了第 1~3 章编写并负责全书编辑及核对工作,刘江侠、毛慧慧同志参加了第 7 章编写并与邢斌同志核对了全书公式推导,刘淑红同志参加了现场考察并参与了第 8 章编写,宋秋波同志参与了第 6 章编写,朱晓春、张祖兴、刘淑红等同志完成了附录的整理、编辑与核对。田翠荣、马娟娟同志在制图等方面做了大量工作。

本书承蒙中国水利学会名誉理事、天津大学原水利系主任、资深教授崔广涛先生和清华大学土木工程系资深教授李著璟先生及水利部水利水电规划设计总院副院长、教授级高级工程师梅锦山先生作序,水利部海河水利委员会科技咨询中心主任、教授级高级工程师李木山先生审稿,河北省、河南省有关单位和人士给予大力支持并提供宝贵资料,天津市中水科技咨询有限责任公司支持出版,在此一并深表敬意和谢意!

本书可供设计人员作为工具书查阅,也可供设计、研究人员及其他人士研究参考。

武博庆

2012 年 5 月 8 日

目 录

第 1 章 概 论	1
1.1 拱渡槽特点与分类	1
1.1.1 拱渡槽特点	1
1.1.2 拱渡槽分类	2
1.2 拱渡槽设计与施工	7
1.2.1 拱渡槽设计	7
1.2.2 拱渡槽施工	8
1.3 拱渡槽与梁渡槽的异同	10
1.3.1 拱渡槽与梁渡槽的相同处	10
1.3.2 拱渡槽与梁渡槽的不同处	10
1.4 拱渡槽与拱桥的异同	10
1.4.1 拱渡槽与拱桥的相同处	10
1.4.2 拱渡槽与拱桥的不同处	11
第 2 章 拱轴线理论及应用	12
2.1 截面合力与荷载压力线	12
2.1.1 截面合力与相应内力	12
2.1.2 图解法确定荷载压力线	13
2.1.3 压力线的实用意义	14
2.2 合理拱轴线	14
2.2.1 合理拱轴线原理	14
2.2.2 三种常用拱轴线的应用	16
2.3 圆弧线在大、中跨径工程中的应用	25
第 3 章 等截面圆弧无铰实腹拱内力计算	27
3.1 理论方法	27
3.1.1 弹性中心 O 点位置 y_s 的计算	27
3.1.2 弹性中心赘余未知力计算	29
3.1.3 拱圈任意截面内力	30
3.2 实用方法(一)——“公路法”	30

3.2.1	“60 年代公路法”	31
3.2.2	“90 年代公路法”	31
3.3	实用方法(二)——捷算法	32
3.3.1	查定内力系数	32
3.3.2	计算内力系数	33
3.3.3	捷算公式的推导	34
3.4	捷算法算例及其与“公路法”比较	35
3.4.1	以本捷算法计算	35
3.4.2	捷算法与“公路法”成果比较	36
第 4 章	等截面圆弧无铰空腹拱内力计算	38
4.1	上部结构设计 with 荷载调整	38
4.1.1	圆弧拱荷载规律	38
4.1.2	靠近拱顶的实腹拱段	39
4.1.3	实腹段至拱脚之间的空腹拱段	40
4.2	不同工况拱轴线合理性检验	41
4.2.1	工况选择	41
4.2.2	检验方法	41
4.2.3	检验结果的评定	46
4.3	不考虑弹性压缩恒载内力计算	46
4.4	考虑弹性压缩恒载内力计算	46
4.4.1	计算公式	46
4.4.2	公式推导	50
4.5	温变内力计算	54
4.5.1	温度变形	54
4.5.2	弹性中心温变附加水平力	54
4.5.3	任意截面均匀温变附加内力	54
4.6	轴线偏离附加内力计算	55
4.6.1	拱渡槽轴线偏离的形成	55
4.6.2	轴线偏离附加内力计算	56
4.7	算 例	62
4.7.1	荷载计算及调整	62
4.7.2	拱轴线合理性检验	62
4.7.3	不考虑弹性压缩恒载内力计算	63
4.7.4	考虑弹性压缩恒载内力计算	64

4.7.5	温度内力计算	64
4.7.6	轴线偏离附加内力计算	68
4.7.7	内力汇总	68
第 5 章	变截面圆弧无铰空腹拱内力计算	69
5.1	荷载设计与拱轴线合理性检验	69
5.2	拱圈自重与拱圈自重力矩	69
5.2.1	截面变化规律	69
5.2.2	拱圈自重与拱圈自重力矩	70
5.3	弹性中心及常变位	74
5.3.1	实用公式	74
5.3.2	弹性中心计算公式推导	77
5.3.3	常变位计算公式推导	79
5.4	考虑弹性压缩恒载内力计算	84
5.4.1	恒载弹性压缩变形	84
5.4.2	考虑弹性压缩恒载内力	85
5.5	均匀温变附加内力计算	86
5.5.1	温度变形	86
5.5.2	均匀温变附加内力	86
5.6	轴线偏离附加内力计算	87
5.6.1	拱渡槽轴线偏离必然存在	87
5.6.2	轴线偏离附加内力计算	87
5.7	算例	94
5.7.1	主拱圈截面尺寸及力学参数	95
5.7.2	设计工况内、应力计算	96
5.7.3	轴线偏离附加内力计算	99
5.8	等、变截面拱主要计算公式对照	102
第 6 章	等截面圆弧两铰拱、三铰拱设计与计算	108
6.1	铰的作用、设置与构造	108
6.1.1	铰的作用与设置	108
6.1.2	铰的类型与构造	108
6.2	等截面圆弧两铰拱内力计算	111
6.2.1	通用公式	111
6.2.2	δ_{22} 的计算	113

6.2.3	Δ_p 的计算	113
6.2.4	温变附加内力	120
6.3	等截面圆弧三铰拱内力计算	120
6.3.1	理论方法	120
6.3.2	实用方法	121
6.4	铰的计算	124
6.4.1	接触面强度验算	124
6.4.2	钢筋混凝土铰的配筋验算	125
第 7 章 拱墩设计及横向稳定		126
7.1	拱墩的作用与类型	126
7.1.1	拱墩的作用和分类	126
7.1.2	拱墩的类型	126
7.2	拱墩的计算	130
7.2.1	外力种类与组合	130
7.2.2	重力式拱墩验算	131
7.3	拱渡槽横向稳定验算	137
7.3.1	主拱横向稳定验算	137
7.3.2	主拱拱脚截面在横向风力作用下的应力叠加安全验算	138
7.3.3	算例	142
第 8 章 工程实例		146
8.1	大跨径圆弧无铰双曲拱渡槽设计实例	146
8.1.1	工程概况	146
8.1.2	立面布置及荷载调整	147
8.1.3	主拱圈截面尺寸及力学特性	150
8.1.4	拱轴线合理性及拱轴线偏离量计算	152
8.1.5	恒载内力计算	156
8.1.6	均匀温变内力计算	158
8.1.7	轴线偏离附加内力计算	159
8.1.8	内力组合及应力计算	159
8.1.9	拱座设计	161
8.2	大跨径悬链线无铰双曲拱渡槽实例	161
8.3	两实例比较	164
附 录		167

第 1 章 概 论

1.1 拱渡槽特点与分类

1.1.1 拱渡槽特点

拱渡槽是拱结构在水利工程中的一种应用,是人们常见的一种输水建筑物,历史久远,实施简易,造型美观,为人们所喜闻乐见。

拱结构作为一种古老的工程技术,广泛应用于古今中外各个领域,形式多样,千姿百态。但从受力角度分析,可分为水平受力和垂直承重两大类。水平受力类是指所受外力为水平方向的拱结构,如拱坝、拱式挡土墙、拱式跌水胸墙等。垂直承重类是指承受垂直竖向荷载的拱结构,如拱桥、拱渡槽、拱式涵洞、拱式屋顶等。

在垂直承重拱结构中,拱渡槽在建造规模、建造数量、建造技术上,占有重要地位。拱渡槽不仅完全具备其他垂直承重拱结构的普通功能、特点,而且还有自己独立的技术特性。所以,我们把拱渡槽的特点归纳为以下 6 个方面,这 6 个方面对我们认识、把握、总结、推进拱渡槽的建设与技术发展有较大意义。

1. 拱圈受力状态好

主拱圈在拱座约束下,把垂直竖向力转化为轴向力,使全拱各截面主要为压应力,很少产生拉应力或仅有很小拉应力,处于受力最佳状态,从而为采用抗压强度高而抗拉强度低的廉价材料提供了先决条件。

2. 适于就地取材,又经久耐用

由于拱圈受力状态好,基本没有拉应力,适于就地取材,因此常采用当地料石、块石、砖等材料砌拱,尤其是料石,抗压强度可达混凝土的 5 倍以上,又易于施工,成拱后不仅美观大方,而且经久耐用,可谓一箭双雕。

3. 跨度大,易跨越

拱渡槽跨度比梁渡槽跨度大得多。梁渡槽跨度一般为 6~12 m,而拱渡槽小跨度为 15 m 左右,中跨度为 30~50 m,大跨度在 60~80 m。广西玉林县万龙双曲拱渡槽跨度为 126 m;湖南郴县乌石江渡槽跨度为 110 m。由于跨度大,给输水工程跨越水面、软滩、峡谷、居民区等施工难度大的区段带来了可能和方便,既可最大限度地规避施工难点和不便,又可显著减少工程投入。

4. 易适应地基条件

拱座对地基的作用力包括垂直力和水平力,而两个力同时受控于矢跨比 f/L ,在上部荷载不变的前提下,增大矢跨比 f/L ,即可增大垂直力,减小水平力;反之,若减小矢跨比,则相应减小垂直力,增大水平力。例如,若把 f/L 由 $1/3$ 减小到 $1/9$,则圆弧拱垂直力可减小 58%,悬链拱垂直力可减小 65%,圆弧拱水平力可增大 1.18 倍,悬链线拱水平力可增大 59%。可见,拱结构对地基适应能力较强,当地基竖向应力或水平应力安全系数偏低而需要采取措施时,适当调整矢跨比 f/L ,就是有效手段之一。

5.多跨连拱需设加强墩

拱渡槽的主拱圈在铅直荷载作用下,对支座产生强大的水平推力,当支座反力能与之平衡时,或中墩两侧水平推力互相抵消时,拱圈便能正常工作。但当支座因某种原因而不能平衡拱脚水平推力时,或中墩一侧拱圈失事而不能抵消另一侧拱圈推力时,拱圈将因拱脚位移而迅速垮塌。而本跨垮塌后,邻跨又会相继垮塌。这就是多跨拱结构的一个很不利的连拱特点。为了适应这个特点,一般每隔3~4跨可将1个中墩设计为能独立承受邻跨水平推力的加强墩,以防止某跨失事全部工程均遭破坏。加强墩的设置,也会给两侧拱跨的横向稳定带来好处。

6.可变恒荷载及其数条荷载压力线

拱结构设计成功的关键是使拱轴线吻合于拱圈所受恒荷载所形成的荷载压力线。拱渡槽恒荷载由拱圈自重、上部结构、槽身、槽内水重等4部分组成,而槽内水重随输水流量改变而改变。因此,拱渡槽的恒荷载是一个可正常改变的恒荷载,相应恒荷载压力线也是随输水流量改变而改变的荷载压力线。也就是说,拱渡槽的荷载压力线并不是一条固定的压力线,而是一条可改变的压力线,或不同时出现的数条压力线。而一条拱轴线是不可能与数条压力线相吻合的。所以,在不同输水流量的情况下,轴线偏离必然存在。在设计计算中,必须计算正常的轴线偏离所引起的附加内力,并确保相应安全。这个特点是拱渡槽所独自固有而拱桥等其他拱结构所没有的特点。由于这个特点,拱渡槽的设计计算在不少方面要比拱桥等其他垂直承重拱结构复杂一些。

1.1.2 拱渡槽分类

拱渡槽可以从4个不同角度加以分类。

1.按主拱截面分类

按主拱圈的截面形式,可分为板拱、肋拱、双曲拱三种。

(1)板拱

板拱是以整个主拱圈宽度为宽度的矩形截面拱。这种拱多用料石、块石、混凝土预制块、砖砌筑而成或用混凝土现浇而成。板拱的特点是截面简单,易于施工,易于就地取材,易于组织当地工匠建造并取得较好效果。尤其当以料石砌筑时,拱圈抗压强度很高,安全系数很大,可获得既美观大方又经久耐用的效果。图1-1、图1-2分别是典型的实腹石板拱渡槽和空腹石板拱渡槽。

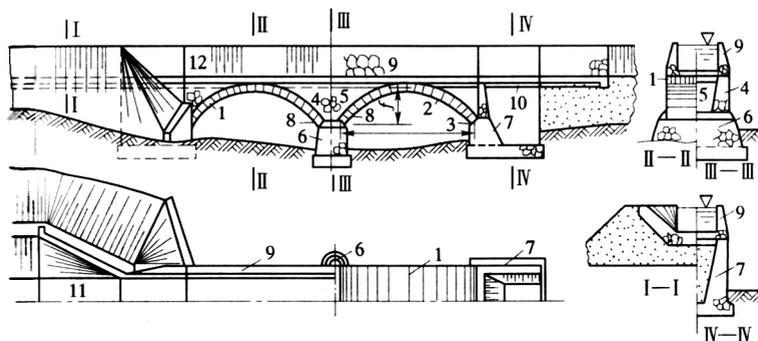


图 1-1 实腹石板拱渡槽

1-拱圈;2-拱顶;3-拱脚;4-边墙;5-拱上填料;6-槽墩;7-槽台;8-排水管;9-槽身;10-垫层;11-渐变段;12-变形缝

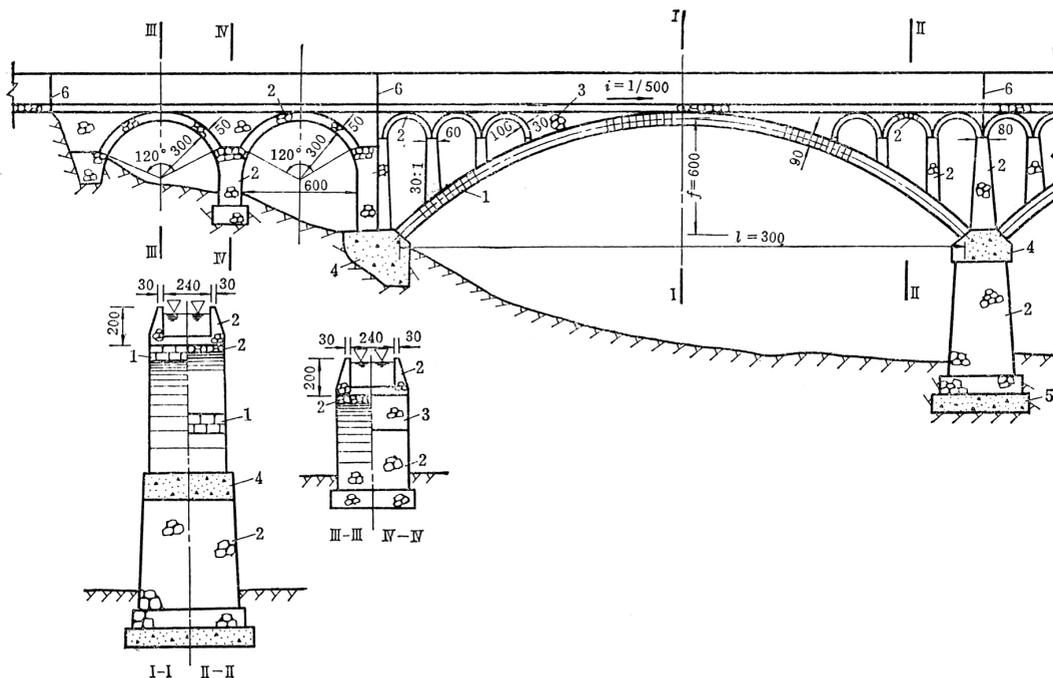


图 1-2 空腹石板拱渡槽(单位:cm)

1-80 号水泥砂浆砌条石;2-80 号水泥砂浆砌块石;3-50 号水泥砂浆砌块石;4-200 号混凝土;
注:除槽身迎水面用 100 号水泥砂浆抹面外,其他浆砌石的外露部分均用 100 号水泥砂浆勾缝

(2) 肋拱

肋拱是为了节省材料和减轻重量,以横向连接的数根矩形拱肋而形成的一个整体主拱圈或整体主拱架为结构特征的拱。这种拱一般为钢筋混凝土结构,小跨度者也可少筋混凝土或素混凝土。拱肋多采用矩形截面,对于承受较大弯矩的大跨度肋拱,也有采用 T 形、工字形或箱形截面的,以便加大抗弯能力,又节省材料。在肋拱渡槽中,一般都把支撑槽身的立墙、立柱改为钢筋混凝土轻型排架,以减轻结构自重。图 1-3 就是一座典型的肋拱渡槽。

(3) 双曲拱

双曲拱是以部分圆环形拱波为主组成主拱圈截面的拱。由于主拱圈是组合型截面,因此又可结合施工和美学考虑,分为有肋、无肋、多波、单波、正反波、悬半波等多种类型。双曲拱可以先预制装配成拱,然后再浇筑现浇层加固,也可将全部拱圈一次浇筑成拱。双曲拱的自重和材料消耗介于板拱、肋拱之间,但具有较大的惯性矩,力学特性好,也易取得较好的曲线美学效果。悬半波式双曲拱就常因侧向线条突出美观而被采用。当跨度较大、流量较小、宽跨比 $b/L < 1/20$ 时,常采用变宽度双曲拱设计以加强横向稳定性。图 1-4 就是一座变宽度双曲拱渡槽。

2. 按主拱上部结构分类

按主拱上部结构形式,可分为实腹式、空腹式两类。

(1) 实腹式

实腹式是用浆砌石将主拱圈与槽身之间的空间砌为实体,或先将空间两侧砌为封闭侧墙,再回填夯实成为实体,以便安设槽身。前者称为砌背式,多用于槽身宽度不大的实腹拱渡槽。后者称为填背式,多用于槽身宽度较大的实腹拱渡槽。实腹拱的最大特点是施工简易,缺