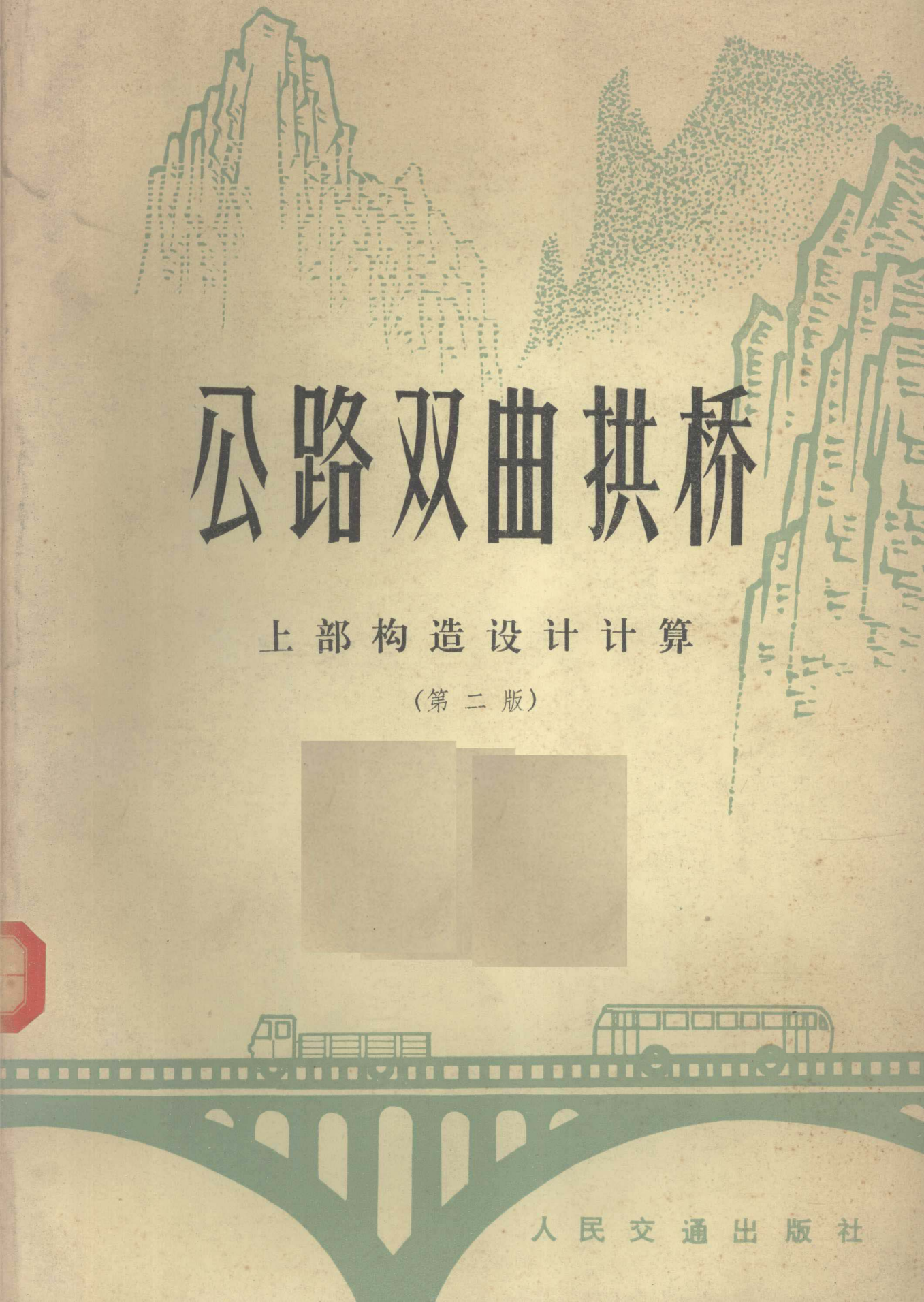
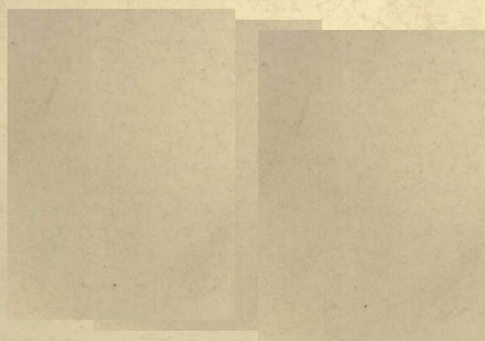




公路双曲拱桥

上部构造设计计算

(第二版)



人民交通出版社

目 录

公路双曲拱桥

上部构造设计计算

(第二版)

交通部科学研究院
江 苏 交 通 局
湖 南 省 交 通 局
江苏省无锡县交通局

编

人 民 交 通 出 版 社

**公路双曲拱桥
上部构造设计计算
(第二版)**

人民交通出版社出版
新华书店北京发行所发行
各地新华书店经售
人民交通出版社印刷厂印

开本: $787 \times 1092 \frac{1}{16}$ 印张: 20 字数: 491 千

1980年4月 第1版

1983年8月 第2版 第2次印刷

印数: 9,501—14,900 册 定价: 3.05 元

内 容 提 要

本书系统地介绍了双曲拱桥的一般构造，着重论述双曲拱桥上部构造设计计算中几个重要问题：跨径及矢跨比的选定、拱轴线的选定及内力计算、拱上建筑与主拱圈联合作用的简化计算、荷载横向分布的近似计算、温度内力及骤变降温简化计算、截面强度计算、平铰拱特性及其设计计算方法。此外书后还附有有关计算用表。本书第二版除对上述内容进行了全面修订外，又增补了等截面圆弧无铰拱、等截面和变截面悬链线无铰拱的挠度影响线计算公式以及相应的计算表格。

本书可供公路桥梁设计、科研部门的技术人员和有关院校师生学习参考。

莫竹竹设计部编

(第二版)

刻交书学桥路交

员 员 交 员 员

员 员 交 省 南 路

员 员 交 县 天 省 员 员

并 出 交 另 人

目 录

第一章 概述	1
第一节 双曲拱桥的创建与发展	1
第二节 双曲拱桥设计和科研工作的发展	1
第二章 双曲拱桥的构造	3
第一节 主拱圈的构造	3
一、主拱圈的截面型式	4
二、拱肋	4
三、拱波	7
四、拱板	8
五、横向联系构件	8
六、截面尺寸的估算	9
七、主拱圈可能出现的裂缝	11
第二节 拱上建筑的布置和构造	13
一、拱上建筑的布置	13
二、空腹式拱上建筑的各组成部分	14
第三节 墩台型式	16
一、桥台型式	16
二、桥墩型式	18
第三章 双曲拱桥上部构造设计原理中的几个问题	21
第一节 双曲拱桥跨径及矢跨比的选定	21
一、跨径的选定	21
二、矢跨比的选定	21
第二节 拱轴线的选定和恒载内力的计算	22
一、悬链线作为拱轴线的相对合理性	22
二、悬链线拱轴系数的选定	27
三、空腹式悬链线无铰拱桥恒载内力的计算	29
四、无支架施工双曲拱桥恒载内力的叠加计算	30
五、预拱度设置	33
第三节 拱上建筑与主拱的联合作用及其简化计算	34
一、拱式拱上建筑与主拱的联合作用及其简化计算	34
二、梁板式拱上建筑与主拱的联合作用及其简化计算	46
第四节 双曲拱桥活载横向分布系数的近似计算	54
一、按弹性支承连续梁算法	54
二、简化算法	56
三、活载横向分布增大系数	56

第五节 双曲拱桥温度和收缩内力的计算	60
一、拱圈温度	60
二、温度内力的计算	61
三、温差取值以及温度内力的组合	62
四、骤变降温内力的简算	64
五、拱圈混凝土的收缩与收缩差	64
六、收缩内力的计算	66
第六节 平铰双曲拱桥的特性及设计计算方法	67
一、平铰拱的概念、特性及适用范围	67
二、平铰拱设计中应注意的一些问题	69
三、平铰拱内力的计算	70
四、平铰拱与无铰拱计算结果的对比	74
第七节 双曲拱桥拱圈截面的强度验算	80
一、双曲拱桥截面偏心受压强度验算公式	80
二、按钢筋混凝土截面以容许应力法计算	82
第四章 双曲拱桥上部构造的设计计算步骤及算例	84
第一节 计算步骤	84
一、选定拱轴系数	84
二、恒载内力的计算	85
三、活载内力的计算	87
四、附加内力的计算	88
五、荷载组合	89
六、平铰拱内力的计算	89
七、主拱圈截面应力的验算	89
八、拱肋吊装应力和稳定的验算	90
九、施工加载程序应力验算	93
第二节 算例	93
〔例一〕 等截面悬链线无铰双曲拱桥上部构造的设计计算	93
$(L_0 = 50 \text{ 米}, \frac{f_0}{L_0} = \frac{1}{6})$	93
〔例二〕 等截面悬链线平铰双曲拱桥上部构造的设计计算	126
$(L_0 = 30 \text{ 米}, \frac{f_0}{L_0} = \frac{1}{6})$	126
参考资料	135
附录一 混凝土、钢筋混凝土和混凝土预制块砌体的容许应力和弹性模量	136
附录二 等代荷载	137
附录三 有填料拱式拱上建筑与主拱联合作用对主拱圈各截面的弯矩折减系数	140
β 值表	140
附录四 等截面悬链线无铰拱计算用表	148
附表4-1 拱轴座标 y_1 (乘数 f)	149

附表4-2~11 截面水平斜角及其正余弦.....	151
附表4-12 弹性中心位置 y_s (乘数 f).....	181
附表4-13 常变位 $\int_s \frac{y^2 ds}{EI}$ (乘数 $\frac{Lf^2}{EI}$).....	182
附表4-14 常变位 $\int_s \frac{ds}{EI}$ (乘数 $\frac{L}{EI}$).....	183
附表4-15 常变位 $\int_s \frac{x^2 ds}{EI}$ (乘数 $\frac{L^3}{EI}$).....	184
附表4-16 弹性压缩系数 μ (乘数 $\frac{I}{Af^2}$).....	185
附表4-17 μ_1 (乘数 $\frac{I}{Af^2}$).....	185
附表4-18 拱圈自重下的弹性中心弯矩 M_s (乘数 $\frac{gL^2}{4}$).....	186
附表4-19 拱圈自重下的弹性中心水平推力 H_s (乘数 $\frac{gL^2}{4f}$).....	186
附表4-20 半拱悬臂自重对截面产生的弯矩 M_{01} (乘数 $\frac{gL^2}{4}$).....	187
附表4-21 半拱悬臂自重对截面产生的竖向力 P_1 (乘数 gL).....	189
附表4-22~31 影响线面积 ω	191
附录五 无铰拱挠度影响线计算.....	201
说明.....	
一、无铰拱挠度影响线的基本计算公式.....	201
二、等截面圆弧无铰拱的挠度影响线计算.....	203
三、等截面悬链线无铰拱的挠度影响线计算.....	207
四、变截面悬链线无铰拱的挠度影响线计算.....	213
附表5-1 等截面圆弧无铰拱挠度影响线计算用表.....	219
附表5-2 等截面悬链线无铰拱挠度影响线计算用表.....	233
附表5-3 变截面悬链线无铰拱挠度影响线计算用表.....	301

第一章 概 述

第一节 双曲拱桥的创建与发展

双曲拱桥是1964年江苏省无锡县建桥职工创建的一种新桥型。这种桥型在结构上继承了砖石拱桥的优良传统，吸收了现代装配式钢筋混凝土桥的优点，在外观上具有民族特色。图1-1是最初双曲拱桥的雏形（图1-1），它是用两根配钢筋的预制混凝土拱形肋（称为拱肋）架设在桥台上，两肋间用几根预制的混凝土横杆互相抵牢，并用穿心螺杆拴紧，与拱肋组成拱架。然后在拱肋上横向砌砖拱（称为拱波），再在砖拱上浇一层混凝土（称为拱板），将各部分结合成整体。这样的结构既发挥了预制装配的优点，可以无支架施工（含义包括简易支架裸肋脱架，下同），节省木材，加快施工进度；又充分利用圬工材料的抗压强度，节省钢材，并便于施工，深受群众欢迎，所以，得到迅速推广。目前南方水网地区双曲拱农桥已星罗棋布，公路桥也已大量修建双曲拱。目前最大跨径已达150米。著名的南京长江大桥的公路引桥上，只用了六十九天，就架设起二十二孔长达七百六十多米的双曲拱桥，为长江大桥增添了民族色彩。湖南省长沙湘江大桥，是我国目前规模最大的公路双曲拱桥之一，正桥长1250米，宽20米，最大跨径76米，支桥长282米，全桥总长1532米，全部采用双曲拱，只用了一年时间就建成。无锡县在大运河上修起了80米净跨的单波双曲拱——新虹桥。水利部门也修了许多双曲拱高架渡槽。可以肯定，这种桥型目前仍在继续发展，更加完善。



图1-1 双曲拱桥的雏形

第二节 双曲拱桥设计和科研工作的发展

江苏省无锡县创建了双曲拱桥以后，最初主要依靠经验进行设计，并在桥梁建成后用静载试验法进行检验。他们在实践中逐步加深对双曲拱桥结构特性的认识，总结出确定双曲拱主拱圈截面尺寸的经验公式，即按照主拱跨径和荷载等级，计算主拱圈截面的三个主要尺寸：主拱圈截面总高度 t 、预制拱肋的底宽 b 和拱波拱板总折算厚度 d 。这个被称为“ t 、 b 、 d ”的方法很简便，易为群众掌握，对双曲拱桥的普及推广起了很好的作用，至今仍被用作初步估定主拱圈尺寸。

有些地方设计公路双曲拱桥时，运用弹性理论，把组合截面按弹性模量之比进行换算，然后和石拱桥一样，按无铰拱理论计算，并逐步和“ t 、 b 、 d ”法结合起来，由“ t 、 b 、 d ”法估定主拱圈尺寸，再按弹性理论进行计算。

在实践中，又发现双曲拱桥设计中的一些新问题，进行了大量专题研究，取得了不少成果。这些问题大致可分为三类：

第一类问题主要是由双曲拱桥的特点所引起的。目前，双曲拱桥建设的发展趋势，是采用无支架施工，拱肋、拱波和拱板分阶段地承受自重及以后所加的恒载，而不是像有拱架的石拱桥那样，主拱圈恒载由全截面承担。这就提出了必须按照施工步骤，采取应力叠加的计算方法。由于无支架施工，对拱轴线的选择也提出了新的要求。

双曲拱桥的主拱圈又是组合截面，拱肋、拱波一般为预制构件，拱板为现浇混凝土，各部分收缩量不同，主拱圈由于收缩差产生不小的附加应力，而石拱桥是不存在这个问题的。对收缩差的应力计算也进行了探讨，提出了初步的计算方法。

第二类问题主要是原拱桥理论中存在的问题。例如，空腹拱采用悬链线作为拱轴线，存在着恒载偏离弯矩，如何进行计算？空腹拱的拱上建筑实际参与结构的联合作用，应当怎样确定合理的计算图式，又如何以简单的形式考虑其影响？活载横向分布如何考虑？突然降温时骤变温差内力如何计算？这类问题在石拱桥中就已存在，由于双曲拱桥主拱圈的截面轻巧，这些问题就显得突出，而必须加以考虑了。

第三类问题是由设计与使用之间的某些矛盾现象而提出的。有些双曲拱桥按一般材料力学公式计算时应力通不过，但使用却很完好；有些双曲拱桥产生了少量桥台位移，按弹性理论计算，应力极大，桥应严重损坏，实际仍能使用；有些拱脚未设锚入拱座钢筋的双曲拱桥，拱脚截面上缘产生径向缝，仍在正常使用。这些情况，使人们去研究拱脚支承的工作状态以及塑性的影响，挖掘设计潜力。通过试验，提出了拱脚支承介乎无铰和双铰间，产生细裂缝却仍能承受弯矩的平铰拱概念及计算方法，并提出了考虑塑性影响的偏心受压截面强度计算方法。

这些研究成果，除截面强度计算已列入规范外，其他都还未列入，其主要内容见第三章，具体应用可见算例。

但是，双曲拱桥设计中仍存在问题，例如考虑拱上建筑联合作用时，拱上建筑的计算，还没有涉及。本书中已讨论的问题，有的也需进一步研究，以加深认识。特别是组合截面的一些问题，如组合截面迭加应力考虑徐变影响的重分布、无支架施工时组合截面的强度验算等，都还有待研究。所有这些，都需在今后实践中，进一步加以解决。

第二章 双曲拱桥设计

第一节 双曲拱桥的组成及主要受力特点

双曲拱桥是由主拱圈、拱上建筑、桥墩、桥台、引道等组成的。主拱圈是双曲拱桥的主要承重结构，它由拱肋、拱波和拱板组成。拱上建筑是指主拱圈以上的部分，包括桥面系、桥面铺装、桥面排水系统等。桥墩和桥台是支撑主拱圈的墩台，引道是连接桥面和道路的通道。

双曲拱桥的主要受力特点是：主拱圈在自重和拱上建筑荷载作用下，产生拱内力和拱上建筑内力。拱内力包括拱轴力、拱弯矩和拱剪力。拱上建筑内力包括桥面系内力、桥面铺装内力和桥面排水系统内力。桥墩和桥台在拱内力和拱上建筑内力作用下，产生墩台内力和墩台位移。引道在车辆荷载作用下，产生引道内力和引道位移。

双曲拱桥的设计应满足以下要求：1. 结构安全：主拱圈应具有足够的强度和刚度，能承受自重和拱上建筑荷载。2. 使用功能：拱上建筑应具有足够的强度和刚度，能满足桥面系、桥面铺装和桥面排水系统的使用要求。3. 耐久性：桥墩、桥台和引道应具有足够的耐久性，能抵抗环境因素的影响。4. 经济性：双曲拱桥的设计应做到技术先进、经济合理。

第二章 双曲拱桥的构造

双曲拱桥的构造见图2-1。

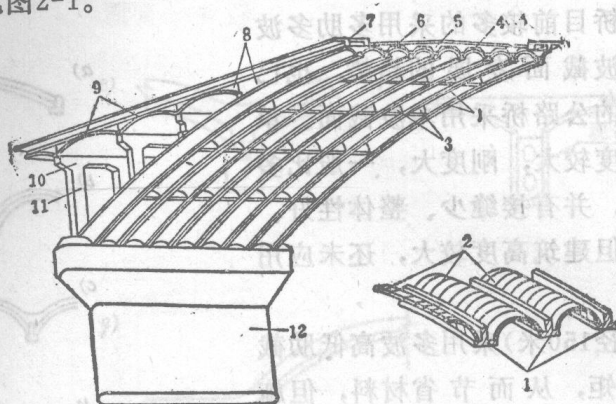


图2-1 双曲拱桥构造示意图

1-拱肋；2-预制拱波；3-横隔板；4-防水层；5-填料；6-路面；7-人行道块件；8-侧墙；9-腹拱；10-盖梁；11-立柱；12-桥墩

第一节 主拱圈的构造

双曲拱桥的主拱圈由拱肋、拱波、拱板和横向联系构件等几部分组成，其外形在纵横两个方向均呈弧形曲线，如图2-2所示。

主拱圈在施工中，经历了“化整为零”和“集零为整”两个阶段。化整为零，就是将主拱圈分成拱肋、拱波、拱板几部分，分别施工，并使先安装的构件起到安装或浇筑下一道工序的支架模板的作用。施工中，先把分段预制的钢筋混凝土拱肋合拢，与横向联系构件组成拱形框架，在拱肋上砌筑混凝土或砖石拱波，然后在拱波上现浇混凝土拱板，形成主拱圈。因此，双曲拱桥的主拱圈为组合截面。拱波在横向做成弧形，既充分利用圬工材料的抗压性能，节省钢筋，又可加大截面刚度，节省圬工。拱板则起主要的组合作用。

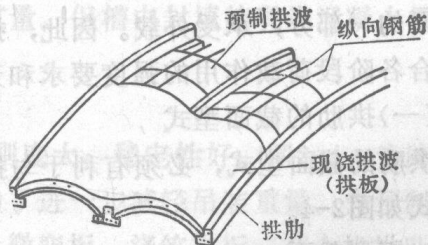


图2-2 主拱圈示意图

集零为整，就是由拱肋、拱波、拱板组成组合截面。必须确保主拱圈的整体性，在承受拱上建筑恒载、活载和其他附加荷载时有足够的强度，不致开裂。构造上往往采用倒T型或槽型拱肋，拱肋上伸出锚固钢筋、拱肋留有凿槽以及拱波厚度不等或作成削口等措施，以加强拱板的组合作用，使主拱圈保持整体承载。

集零为整，就是由拱肋、拱波、拱板组成组合截面。必须确保主拱圈的整体性，在承受拱上建筑恒载、活载和其他附加荷载时有足够的强度，不致开裂。构造上往往采用倒T型或槽型拱肋，拱肋上伸出锚固钢筋、拱肋留有凿槽以及拱波厚度不等或作成削口等措施，以加强拱板的组合作用，使主拱圈保持整体承载。

“零”和“整”，是双曲拱桥矛盾着的两个方面，其中“化整为零”是方便施工而采取的手段；“集零为整”是达到预期承载能力的目的，矛盾的主要方面是“整”。因此，必须要在设计、施工各方面都采取保证整体性的措施，这也是双曲拱桥不同于整截面施工的圬工拱

桥而具有的特殊性。在推广双曲拱桥的初期，曾对这点认识不足，没有采取足够的措施，加上出现过大的桥台水平位移，使有些桥的主拱圈产生了一些裂缝，整体性受到削弱，降低了承载能力。通过调查分析，总结了产生裂缝的原因，提出了保证主拱圈整体性的一套有效措施。关于主拱圈裂缝的类型及其产生原因，将在本节后面讨论。

一、主拱圈的截面型式

双曲拱桥主拱圈截面有单波、多波、多波高低肋等型式（图2-3）。农桥由于宽度不大，常采用单波截面。公路桥目前较多的采用多肋多波截面，近来有向少肋少波截面发展的趋势，也已有少量单车道和双车道的公路桥采用单波截面。单波截面由于主拱圈总高度较大，刚度大，一般比多波截面节省钢材与圬工，并有接缝少、整体性好、横向受力均匀等优点。但建筑高度较大，还未应用于较宽的公路桥。

河南前河大桥（跨径150米）采用多波高低肋截面，以得到较大的惯性矩，从而节省材料，但施工不便，未予推广。

在两个边肋上挑出半波的悬半波截面，可节省一根拱肋，减小侧墙高度，桥型也显得轻巧美观。但悬半波的施工稍复杂些。

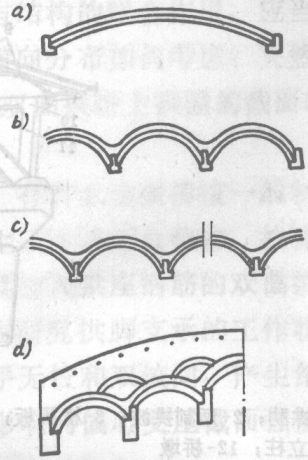


图2-3 主拱圈截面型式
a) 单波；b) 多波；c) 悬半波；d) 多波高低肋

二、拱肋

拱肋是双曲拱桥主拱圈的骨架，在架设过程中承受自重，架设后承受横向联系构件、拱波以及相应的施工荷载，起到拱架或部分拱架的作用。当拱波、拱板完成后，拱肋又成为组合截面的一部分，承受外载。因此，拱肋的设计，既要考虑吊装时的强度要求，又要考虑截面组合各阶段荷载作用的强度要求和无支架施工时拱肋纵横向稳定的要求。

（一）拱肋的截面型式

拱肋的截面型式，必须有利于与拱波、拱板的结合，保证组合截面的整体性。常用的截面型式如图2-4。

1. 矩型截面

形式简单，预制方便，但由于现浇拱板与拱肋、拱波的结合面为通缝，且结合面小，容易在结合面上产生环向裂缝，影响截面的整体性。目前仅在某些小跨径桥梁上采用，公路桥上一般已不采用。

2. 倒T型、I型、L型和T型截面

倒T型和I型肋用作中间肋，L型和T型肋用作边肋。采用悬半波时，倒T型和I型肋也用作边肋。倒T型肋的直梗一般上宽下狭，以加强与拱板的结合。I型、L型肋用于较大跨径，实际上是在倒T型、L型肋上加一个上翼缘板，使拱肋在无支架吊装过程中受力更为合理。这四者基本属于一种类型。

这类截面把上缘伸入拱板现浇层内，既不存在通缝，又增加了拱板与拱肋的结合面，加大了抗剪、抗拉能力。同时，预制拱波置于肋的下翼缘，离组合截面的重心轴较远，剪应力

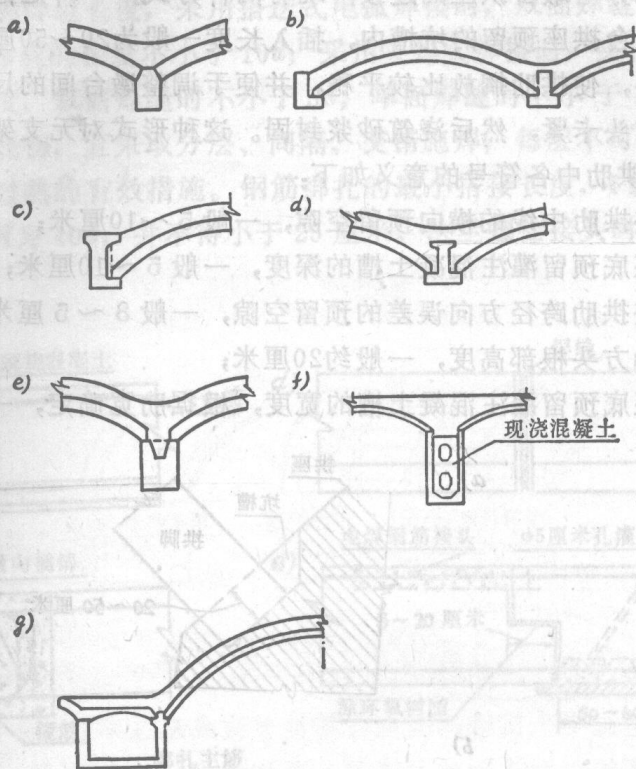


图2-4 拱肋截面型式

a) 矩型截面；b) L型、倒T型截面；c) T型截面；d) 工型截面；e) 槽型截面；f) 薄壁槽型截面；g) 箱型截面

较小。因此，这类截面基本克服了结合面上环向裂缝的产生，保证了组合截面的整体性。

3. 槽型截面

是将矩型拱肋挖空而成的截面型式（图2-4 e），加大了结合面，结合性能很好，不易产生肋波间的环向裂缝。对特大跨径桥，可作成薄壁槽型截面，图2-4 f 为跨径116米的湖南省罗依溪大桥的拱肋截面，大大减轻了拱肋吊装的重量。但槽内封填的现浇混凝土量较多，对混凝土的收缩问题较难处理。

4. 薄壁箱型截面

用于无支架施工的大跨径双曲拱桥。拱肋横向刚度大，稳定性好。图2-4 g 为跨径60米的陕西省石泉三岔河桥的主拱截面，系箱肋单波，为了进一步减轻吊装重量，先预制成薄壁槽型截面，当槽型肋合拢成拱后，砌筑拱波，再盖上微弯板，浇筑拱板。在合拢拱肋和砌筑拱波时，可在槽型截面内操作，施工也较安全。

(二) 拱肋的构造

拱肋一般为钢筋混凝土构件，应按施工及使用阶段的受力情况，通过计算，配设钢筋。为了保证拱圈的整体性，还往往在拱肋上缘设置齿槽或锚固钢筋（图2-5）。齿槽设在拱脚至 $L/4$ 范围，有直梗的拱肋，齿槽常设置在梗部的顶面或侧面，槽长10厘米，深2厘米，齿长50~100厘米，拱脚附近齿可短些， $L/4$ 附近齿可长些。锚固钢筋直径一般为8~10毫米，间距一般不宜大于40~60倍直径，从拱脚到 $L/4$ 可布置得密些；可能发生桥台位移时，拱顶附近也要适当布置得密些，以利拱脚区段的抗剪和拱顶区段的抗拉。

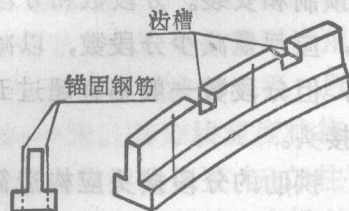


图2-5 拱肋齿槽和锚固钢筋

拱肋的拱脚部分与墩台拱座的连接，现有两种方式：一种是把拱肋按原截面作得长一些，安装时插入墩台拱座预留的坑槽内，插入长度一般为20~50厘米；一种是把拱肋在起拱线下增加一个方头，使拱肋搁放比较平稳，并便于调整墩台间的尺寸误差。在调整就位后，用钢板或铁板把方头卡紧，然后浇筑砂浆封固。这种形式对无支架施工十分方便。

图2-6 b 方头拱肋中各符号的意义如下：

- a —— 调整拱肋中线的横向预留空隙，一般5~10厘米；
- b —— 肋座底预留灌注混凝土槽的深度，一般5~10厘米；
- c —— 调整拱肋跨径方向误差的预留空隙，一般3~5厘米；
- d —— 拱肋方头根部高度，一般约20厘米；
- e —— 肋座底预留灌注混凝土槽的宽度，根据肋宽确定，一般约为肋宽的一半。

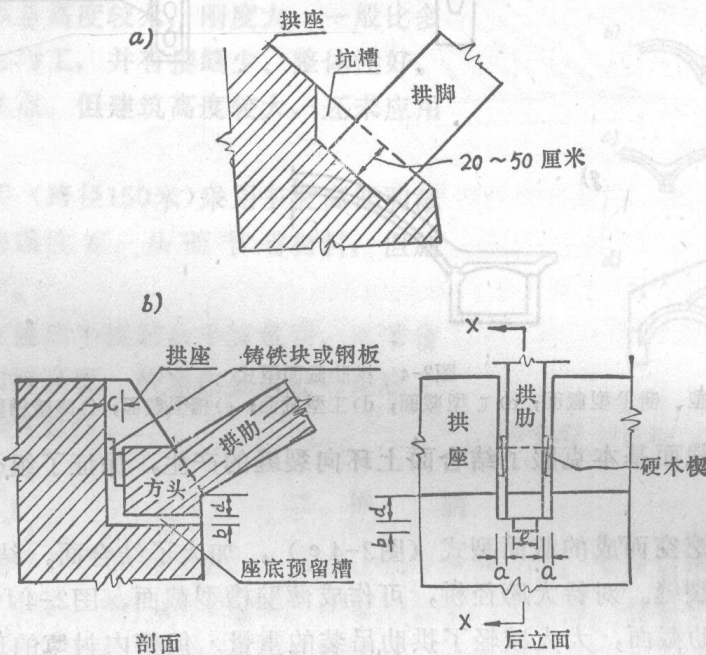


图2-6 拱肋与拱座的连接
a) 拱肋插入拱座；b) 方头拱肋

大跨径双曲拱桥，特别是单波截面时，常将拱脚段拱肋适当加宽，一般自 $L/8$ 开始逐渐加宽至拱脚截面，以满足拱脚截面压应力的需要。

(三) 拱肋的接头

一般双曲拱桥跨径在20~25米以下时，拱肋可采取整根预制和吊装。跨径再大时，常分段预制和安装。分段数和分段长度，应根据吊装能力和施工方便来确定，在条件许可的情况下，应尽量减少分段数，以减少拱肋接头。一般分为两段或三段，大跨径时也有分为五段的，但分段数一般不宜超过五段。分段数最好取奇数，不取偶数，使受力很大的拱顶部位没有接头。

拱肋的分段接头应构造简单，结合牢固，便于操作。在简易排架上施工的拱肋，可采用主筋焊接、绑扎或主筋环状套接等现浇混凝土接头。没有简易排架时，较常用的有钢板电焊接头、环氧树脂电焊主筋搭接接头或法兰螺栓接头（均见图2-7）。有时为了便于拱肋的吊装定位，在接头处设简易定位器。

现浇接头处的混凝土标号，应较拱肋混凝土高一级。连接钢筋、钢板（或型钢）的截

面，应通过计算决定。钢筋的焊缝长度，采用搭迭式电弧焊接时，双面焊缝的长度不小于 $5d$ (d 为钢筋直径)，单面焊缝的长度不小于 $10d$ ；采用夹焊式焊接时，夹杆总面积应不小于被焊钢筋的面积；夹杆长度，双面焊缝时不小于 $5d$ ，单面焊缝时不小于 $10d$ 。焊接时，应注意防止周围混凝土过热烧伤，宜采取分层、间隔、交错施焊，每层不可一次焊得过厚；或采取其他防止周围混凝土过热的有效措施。钢筋绑扎的最小搭接长度，I 级钢和 5 号钢为 $30d$ ，II 级钢为 $35d$ ，III 级钢为 $40d$ ，并不得小于 25 厘米。法兰螺栓接头时，螺栓拧紧后应焊死。

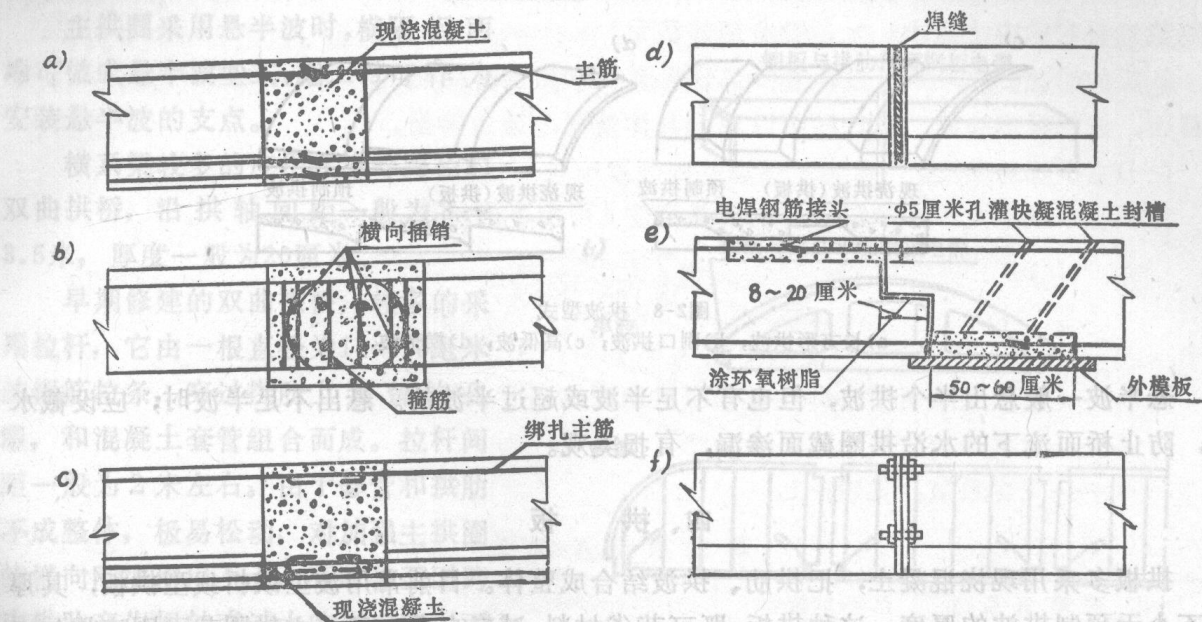


图2-7 拱肋接头

a)主筋焊接现浇混凝土接头；b)环状钢筋混凝土接头；c)绑扎钢筋现浇混凝土接头；d)钢板电焊接头；
e)环氧树脂电焊主筋搭接接头；f)法兰螺栓接头

三、拱 波

公路双曲拱桥常用混凝土预制拱波。有时为了节约水泥，也可因地制宜的采用砖砌或石砌拱波。砖石拱波的砌筑，可在拱肋之间架设的滑动托架上进行，施工简易，但进度较慢，也费人工。

混凝土预制拱波多采用圆弧线，按其跨径和宽度，可分为普通型和大型两种。普通型混凝土预制拱波的跨径一般为 $1.3\sim 2.0$ 米，厚度 $6\sim 8$ 厘米，矢跨比为 $1/2\sim 1/5$ 。其分块大小，取决于起重能力，如采用人力抬运，宽度多为 $30\sim 50$ 厘米，控制重量在 80 公斤左右。随着少波和单波截面双曲拱桥的发展，大型混凝土预制拱波逐渐在无支架施工中得到应用，可以充分发挥吊装设备的效能，加快施工进度，减轻劳动强度。大型预制拱波的跨径一般为 $3\sim 5$ 米，厚度为 $6\sim 8$ 厘米，矢跨比为 $1/4\sim 1/6$ ，宽度为 $2.5\sim 5$ 米。其分块宽度往往由横隔板的间距决定，相邻两横隔板之间放一块大型拱波。通常由于横隔板的位置与立柱相应，横隔板沿拱轴方向的间距不一定相等，因此拱波的分块宽度也可能各不相等，各分块纵向也须按所在部位的座标放样，曲率各不相同，吊装时需对号就位。大型预制拱波一般均布置直径为 $4\sim 6$ 毫米的钢筋网，网格间距为 30×30 厘米。为了加强预制拱波的刚度，一般在拱波背部加井字形加劲肋，并可加强拱波与现浇拱板的结合。

预制拱波的型式，早期都做成等厚，且分块两侧做成整齐的竖直面。它与现浇拱板混凝土的结合，仅靠波背的砂浆粘结力，对保证主拱圈整体性不利。为了改进上述缺点，往往做成梯形波、高低波和削口波（图2-8）。目前常用的是削口波，它只有一种分块型式，制作方便。

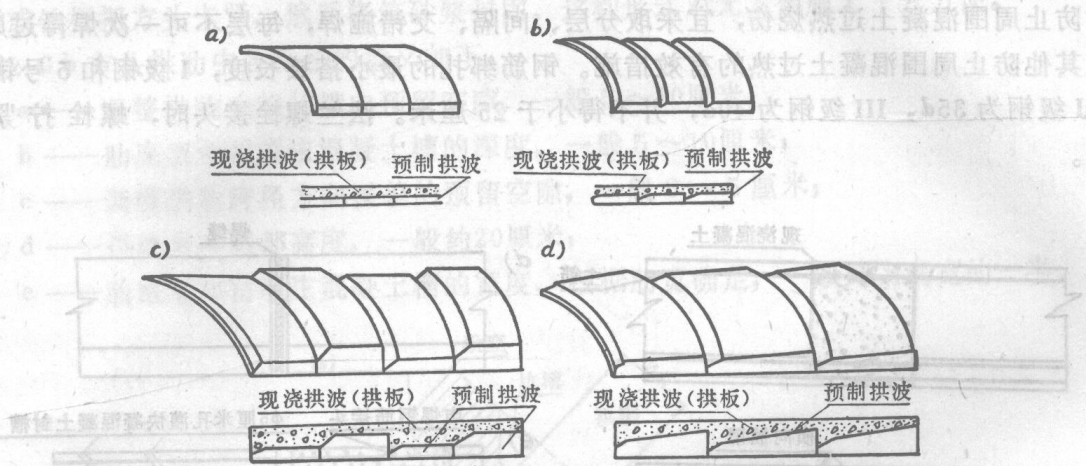


图2-8 拱波型式
a)长方形拱波；b)削口拱波；c)高低波；d)梯形波

悬半波一般悬出半个拱波，但也有不足半波或超过半波的。悬出不足半波时，应设截水槽，防止桥面流下的水沿拱圈截面渗漏，有损美观。

四、拱板

拱板多采用现浇混凝土，把拱肋、拱波结合成整体。目前常用波型或折线型拱板，其厚度不小于预制拱波的厚度。这种拱板，既可节省材料，减轻自重；又使主拱圈截面刚度均匀，截面形心接近中部，受力比较合理。

早期曾采用填平式拱板，因其体积大，且主拱圈截面厚薄不均，刚度相差较大，波顶薄弱，在活载和混凝土收缩、温度变化等附加荷载作用下，常导致波顶纵向开裂。现一般已不采用。

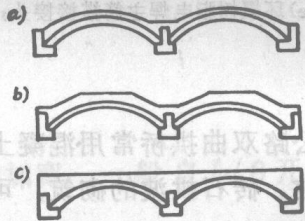


图2-9 拱板型式
a)波形；b)折线型；c)填平式

拱板中钢筋应根据受力情况进行布置。即使在计算不需钢筋时，也宜在拱板顶部适当布置纵向构造钢筋。中等跨径的双曲拱桥，拱板顶部一般设置2~3根直径12~16毫米的纵向钢筋。拱脚截面拱板钢筋的配置，视拱脚支承型式而定：若为无铰拱，当拱脚上缘拉应力小于混凝土容许拉力时，则只须构造配筋；当拱脚上缘拉应力大于混凝土容许应力时，则须按钢筋混凝土大偏心受压构件计算配筋。无论是受力钢筋或构造钢筋，均须与墩台拱座伸出的钢筋焊接，受力钢筋一般向上延伸到邻墩台的第一排立柱或横墙处。若为平铰拱，则板顶的纵向钢筋不通过拱脚截面，不锚入墩台拱座。拱顶、拱脚区段宜在板顶适当布置横向钢筋，与拱肋锚固钢筋、板顶纵向钢筋连接，并予以张紧，以提高主拱圈的整体性。

五、横向联系构件

主拱圈设置横向联系构件的目的，是为了保证主拱圈的整体性。在无支架施工中，可提

高裸肋的横向稳定性，并承受砌筑拱波和浇筑拱板时的横向水平推力。在主拱圈形成后，可提高横向刚度，使主拱圈在活载作用下受力较均匀。因此，横向联系构件是主拱圈不可缺少的组成部分。

横向联系构件常用的有横隔板和横系梁两种。

横隔板有框架式和实心式两种，其横向刚度大，多用于大跨径桥和宽桥，其间距以不超过5米为宜。在拱顶、立柱或横墙部位以及拱肋接头处，均应设置横隔板，拱脚附近最好也设置。小跨径宽桥的拱顶，横隔板应特别加强。中等跨径的双曲拱桥，一般将横隔板与横系梁间隔使用。横隔板伸入拱板的部分，最好与拱板一起现浇，以免留工作缝。

主拱圈采用悬半波时，横隔板两端可做成悬半波型式，施工时可作为安装悬半波的支点。

横系梁较多的应用在中等跨径的双曲拱桥，沿拱轴间距一般为3~3.5米，厚度一般为20厘米。

早期修建的双曲拱桥，较多的采用拉杆，它由一根直径为14~16毫米的钢筋拉条，穿过拱肋上预留的孔眼，和混凝土套管组合而成。拉杆间距一般为2米左右。由于套管和拱肋不成整体，极易松动，对加强主拱圈的横向刚度作用不大，有时甚至因跨中拱肋产生扭转或过大的横向变形而出现波板纵向裂缝。目前仅在有些小跨径农桥上采用，公路桥上已不采用。

由于横向联系构件受力状态较复杂，计算也繁复。目前一般均按经验确定尺寸及配筋。可设置4~8根直径为10~16毫米的钢筋，（横系梁4根，空心横隔板8根），并尽量使其与拱肋的主筋连接。

横隔板或横系梁一般均为预制构件，端头埋镶钢板，与拱肋预埋钢板焊接。拱肋现浇接头处的横隔板则往往采用现场浇筑。

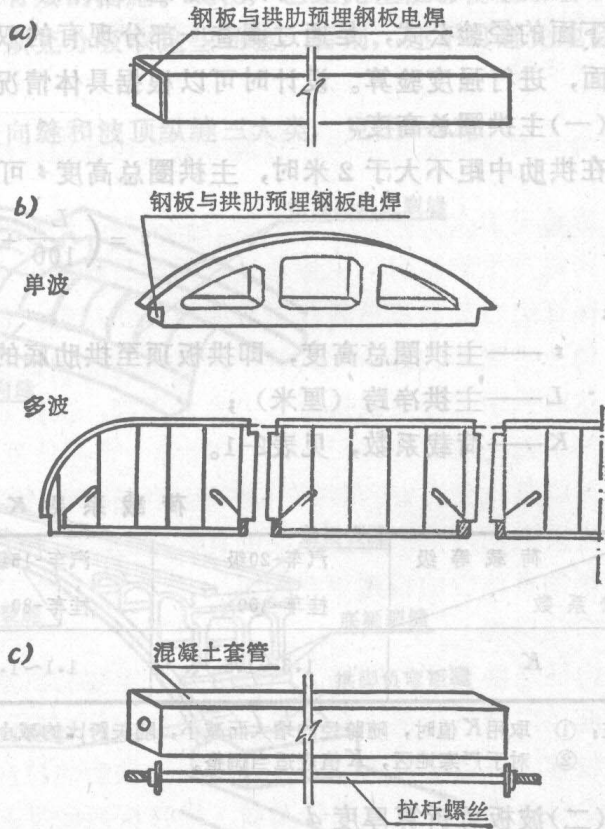


图2-10 横向联系构件型式
a)横系梁；b)横隔板；c)拉杆

六、截面尺寸的估算

双曲拱桥主拱圈截面的尺寸，主要由拱肋间距 l ，主拱圈总高度 t ，波板总折算厚度 d 和拱肋底宽 b 来确定。在桥宽已定的条件下，首先确定 l ，即拱波净跨加肋底宽，拱波净跨一般为1.3~2.0米。大跨径桥有时把 l 取得很大，此时截面尺寸不能用下列经验公式估算。

主拱圈的总高度 t 直接影响截面刚度。 t 大时，截面刚度大，主要荷载的应力减少。但温度、收缩等附加力由于与截面刚度成正比，刚度越大，附加力越大。因此，不能笼统地认为刚度越大的截面越好，而片面追求主拱圈的总高度。截面刚度的选择应使在主要荷载和附

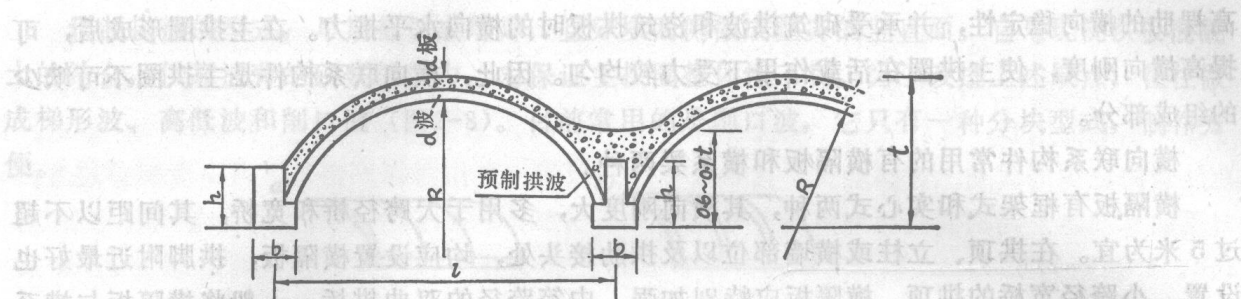


图2-11 主拱圈截面尺寸的估算

加荷载组合时的应力最小，才是最合理的截面。

下面的经验公式，是通过调查一部分现有的双曲拱桥而提出，可用作估算尺寸，以便布置截面，进行强度验算。设计时可以根据具体情况，适当调整。

(一)主拱圈总高度 t

在拱肋中距不大于 2 米时，主拱圈总高度 t 可按下式估算，

$$t = \left(\frac{L}{100} + 35 \right) K \quad (2-1)$$

式中：

t ——主拱圈总高度，即拱板顶至拱肋底的高度（厘米）；

L ——主拱净跨（厘米）；

K ——荷载系数，见表 2-1。

荷载系数 K 值表

表 2-1

荷载等级	汽车-20级	汽车-15级	汽车-10级	<汽车-10级
荷载系数	挂车-100	挂车-80	履-50	
K	1.3~1.5	1.1~1.3	0.9~1.1	0.8~0.9

注：① 取用 K 值时，随跨径的增大而减小，随矢跨比的减小而增大；

② 对于严寒地区， K 值应适当调整。

(二)波板总折算厚度 d

波板总折算厚度为拱板厚度和按波板弹性模量比折算的拱波厚度之和，即

$$d = d_{\text{板}} + \frac{E_{\text{波}}}{E_{\text{板}}} d_{\text{波}} \quad (2-2)$$

多波主拱圈截面的 d 值，可按下式估算：

$$d = \frac{L}{800} + (6 \sim 12) \quad (2-3)$$

$d_{\text{波}}$ 一般为 6~8 厘米，由估算式的 d 值，即可反算出拱板厚度。而 $d < d_{\text{板}} + d_{\text{波}}$ 。

式中： d 、 L 单位均为厘米。常数项的选用原则为，跨径增大、矢跨比减小、荷载增大时取大值，反之则取小值。

(三)拱肋的底宽 b 和高度 h

拱肋的截面面积一般以不小于主拱圈全截面面积的 1/4 为宜。有支架施工时，拱肋高度可按主拱圈总高度的 0.3~0.5 倍估算。无支架施工时，拱肋高度应根据裸肋纵向稳定计算确