

桥 拱 工 巧

王世槐 编

人 民 交 通 出 版 社

前 言

拱桥在我国有悠久的历史，是一种造型美观、经济耐久的传统桥梁结构型式。随着我国公路交通事业的发展，这种取材容易、构造简单的桥型在全国各地公路建设中得到了普遍的采用。

本书重点介绍用砖、石、混凝土材料修建的圬工拱桥，并详细地叙述其设计原理和计算方法。对于涉及到的力学知识也加以简单的介绍。为便于读者掌握拱桥的计算方法，书中附有一座主孔净跨为60米的等截面悬链线空腹式无铰石拱桥主拱圈及其墩、台的计算实例。此外，附录中有设计常用的有关用表。

本书是一本普及桥梁技术理论知识的书籍，可作为一般桥梁工作者的自学读物或职工业余学习教材，也可作为大专院校道路专业学生的参考书籍。编写本书的目的是让读者对拱桥的设计计算有一比较完整的理解，并能独立从事大、中跨径圬工拱桥的设计工作。由于编者水平所限，不妥之处尚请读者指正。另外，本书稿承重庆交通学院桥梁教研室拱桥小组审阅，谨致谢意。

编 者

1981.5.1

内 容 提 要

本书专门介绍采用砖、石、混凝土材料修建的圬工拱桥设计原理和计算方法，并附有算例和计算用表。

全书内容简明易懂，可作为一般桥梁工作者自学读物或职工业余教材，也可作为大中专院校道路与桥梁专业学生参考。

圬 工 拱 桥

王 世 槐 编

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：787×1092 $\frac{1}{32}$ 印张：11 字数：245 千

1983年2月 第1版

1985年3月 第1版 第2次印刷

印数：5,501—9,810册 定价：2.70元

目 录

第一章 概述.....	1
第一节 拱桥发展概况.....	1
第二节 圬工拱桥的特点和分类.....	3
第三节 拱的力学特性.....	5
一、拱与梁的受力分析.....	5
二、拱的压力线.....	6
三、静定拱与超静定拱.....	8
第二章 圬工拱桥构造.....	12
第一节 上部构造.....	12
一、主拱圈.....	13
二、拱上构造.....	19
三、桥面系.....	23
四、拱铰、变形缝、排水及防水.....	25
第二节 下部构造.....	29
一、桥墩.....	29
二、桥台.....	34
三、基础.....	37
第三章 圬工拱桥设计.....	41
第一节 立面布置.....	41
一、分孔定跨径.....	41
二、选择矢跨比.....	44
三、确定桥面与拱脚标高.....	45
四、布置拱上构造.....	47
第二节 横截面布置.....	49
一、拱圈宽度拟定.....	49

二、拱圈高度拟定·····	49
第三节 拱轴线型的选用·····	55
一、圆弧线·····	55
二、二次抛物线·····	56
三、悬链线·····	58
第四节 桥墩与桥台的尺寸拟定·····	58
一、桥墩尺寸拟定·····	58
二、桥台尺寸拟定·····	60
第四章 圬工拱桥计算·····	62
第一节 悬链线无铰拱几何性质·····	62
一、拱轴线公式·····	62
二、拱轴线水平倾角·····	67
三、拱轴系数确定·····	68
第二节 悬链线无铰拱计算方法·····	73
一、力法方程·····	73
二、弹性中心·····	83
第三节 恒载内力及弹性压缩·····	85
一、不计弹性压缩的恒载内力·····	85
二、弹性压缩·····	88
三、计入弹性压缩的恒载内力·····	91
第四节 影响线及活载内力·····	94
一、无铰拱内力影响线·····	94
二、活载内力·····	108
第五节 温度变化及混凝土收缩产生的附加内力·····	112
第六节 拱脚位移产生的附加内力·····	114
一、拱脚相对水平位移引起的附加内力·····	115
二、拱脚相对垂直位移引起的附加内力·····	116
三、拱脚相对角位移引起的附加内力·····	117

第七节 荷载组合与拱圈强度验算	119
一、荷载组合	120
二、拱圈强度验算	121
第八节 裸拱强度及稳定性验算	125
一、裸拱的强度验算	125
二、裸拱的稳定性验算	127
第九节 拱圈应力调整	133
一、恒载偏离弯矩调整应力	134
二、假载法调整应力	137
三、临时铰法调整应力	141
第十节 二铰拱、三铰拱及拱铰计算	142
一、二铰拱计算	142
二、三铰拱计算	159
三、拱铰计算	166
第十一节 桥墩与桥台计算	168
一、桥墩的计算	168
二、桥台的计算	177
第十二节 石拱桥计算实例	186
一、主拱圈计算	186
二、桥墩计算	222
三、桥台计算	231
第五章 圬工拱桥施工	246
第一节 石料采备与拱圈放样	246
一、石料采备	246
二、拱圈放样	248
第二节 拱架	250
一、拱架类型及构造	250
二、拱架计算	259

三、拱架预拱度设置.....	266
四、拱架安装与卸落.....	269
第三节 拱圈及拱上构造施工.....	273
一、拱圈施工.....	273
二、拱上构造施工.....	276
第四节 墩、台施工注意的问题.....	276
一、桥墩施工注意问题.....	277
二、桥台施工注意问题.....	277
附录:	
I、等截面悬链线无铰拱计算用表.....	279
II、悬链线无铰拱影响线等代荷载表	319
III、圬工材料及木材的容重与容许应力和 弹性模量表	332
IV、计算荷载与验算荷载纵、横向排列图 和主要技术指标及车辆荷载等级选用表	340

第一章 概 述

第一节 拱桥发展概况

在我国，远在二千多年前的周朝就出现了用石料砌成的拱结构。隋代大业年间(公元600~610)，李春设计建造了闻名世界的河北赵州桥(图1-1)，到现在已一千三百多年。赵州桥是一座单孔圆弧石拱桥，跨径37.02米，矢高7.23米，矢跨比约 $1/5$ 。大拱上左右各有两个小拱，使桥跨自重减轻，

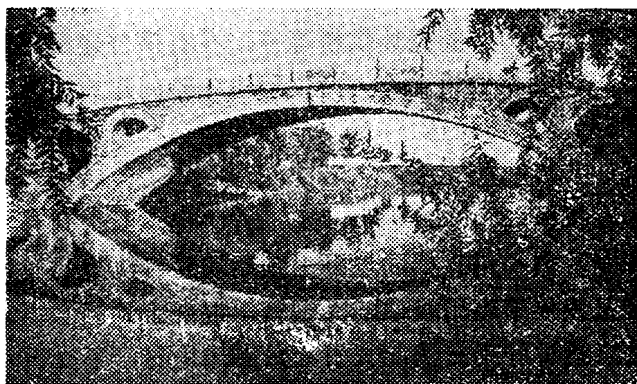


图1-1 赵州桥

基底应力变小。当洪水泛滥时，大小拱可同时泄水，减少了水流对桥身的冲击力量。这种先进的构造方法，在今天看来有高度的科学性，它不仅是我国，也是世界上第一座空腹式的石砌拱桥。赵州桥在我国的桥梁建筑史上留下了光辉的一

页。由于拱桥结构造形雄壮优美，远望如长虹映空，所以有名的长沙湘江大桥及南京长江大桥的引桥都采用了拱桥型式。

目前我国公路桥梁建设中，拱桥——特别是石拱桥得到了普遍推广、使用，最大跨径已超过100米。如1961年云南建成的长虹大桥，跨径为112.5米；1964年江苏省无锡县在总结我国石拱桥经验的基础上创建了一种轻型的双曲拱桥，不久河南前河桥即采用这种结构型式建成，其跨径达到150米。全国公路部门在推广建造双曲拱桥的过程中，推陈出新，又先后创造出不少新型拱桥。如四川建造了刚度大、吊装施工稳定性好的箱型拱桥，最大跨径达150米；上海、浙江等地建造了自重轻、施工快、适应软土地基的桁架拱桥，最大跨径达75米；山东建造了建筑高度小、适用于平原丘陵地区宽浅河流的二铰平板拱桥；河南、陕西等地建造了用料省，受力好的壳体拱桥等等。在石拱桥建造方面也有所发展，1972年四川丰都人民仅用一年时间建成的九溪沟大桥（图1-2），跨径达116米，成为我国迄今跨径最大的一座石拱桥。

在拱桥的建造过程中，施工方法也不断得到改善。1961年广东首创少用拱架的混凝土预制块悬砌法施工，其后许多地区又发展了不用拱架的大型钢筋混凝土预制块缆索吊装施工法。这种施工方法能节省大量支架用材，不受洪水威胁，并能兼顾通航，很适宜在高山峡谷、水深流急的河流上修建大跨径拱桥。1977年四川试验用少量起吊设备的转体施工方法获得成功。这种方法，适宜于修建单孔大中跨径拱桥。这些新的施工方法，不仅能节约施工用料，并能加快建设速度，为实现建桥机械化、装配化提供了有利条件。

当前，拱桥的新结构，新工艺层出不穷，并在设计计算

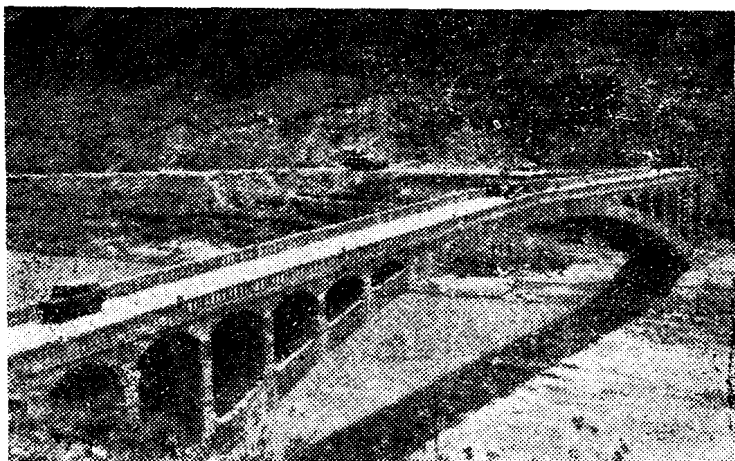


图1-2 九溪沟大桥

中已开始运用电子计算机技术，它使计算快速且精度提高，设计自动化将可实现。我国桥梁建设必将逐步走向一个更新更高的水平，以适应公路交通发展的需要。

第二节 圬工拱桥的特点和分类

砖、石、混凝土等建筑材料通常统称为“圬工”，用圬工建造成的拱桥称为圬工拱桥。

圬工拱桥有几个比较显著的特点：能就地取材，和钢桥、钢筋混凝土桥相比，可节约大量水泥和钢材；施工设备简单，不需大型、复杂的机具；建造工艺简单容易掌握；坚固耐久，养护简便；刚度大，承载潜力也大，和一般梁桥相比，行车时的震动和噪音均小。此外造型雄壮美观，具有一种独特的建筑风格。但需指出，建造石拱桥也有不利的一面，如备料时间长，使用劳动力多，且砌筑拱圈要用大量木

材搭设支架。另外，拱桥由于拱脚推力大，要求墩台的圬工量也大。而无铰拱桥对其地基的要求较高，桥址选择受到一定的限制。为了缩短工期，少用木料，目前倾向采用预制混凝土块横向悬砌的少支架方法施工。

圬工拱桥可按拱圈材料，截面型式，拱上构造，拱轴线型，设铰的数目等五个方面来进行分类。

按拱圈材料可分为砖拱桥、石拱桥和混凝土拱桥。

按截面型式可分为板拱桥、肋拱桥和箱拱桥。板拱桥和肋拱桥又可按截面有无变化，分为等截面拱桥和变截面拱桥。

按拱上构造可分为实腹式拱桥和空腹式拱桥。

按拱轴线型可分为圆弧拱桥、悬链线拱桥及抛物线拱桥。

按设铰的数目和力学特性可分为三铰拱桥、二铰拱桥及无铰拱桥。

以上是从狭义的范围来分类的，以便于区别和比较其同类拱桥。实际上在设计一座拱桥时，必须同时考虑拱圈材料、截面型式、拱上构造以及所用拱轴线型和是否设置拱铰等因素，所以彼此互有联系而不能截然分开。关于双曲拱桥、箱型拱桥、桁架拱桥、二铰平板拱桥等新型拱桥，或因吊装的需要或因受力的要求，均在主要承重构件的拱圈内设置了不同数量的钢筋，按其拱圈材料的组成可统称为混凝土拱桥或钢筋混凝土拱桥。

除圬工拱桥和钢筋混凝土拱桥外，还有用钢材建造的钢拱桥。本书侧重于圬工拱桥的介绍。

第三节 拱的力学特性

一、拱与梁的受力分析

拱与梁的外形不同，受力特点各异。拱是一种推力结构。在竖向荷载作用下，梁支承处仅产生垂直反力，而拱除产生垂直反力外，还产生一个指向跨内的水平反力，这个水平反力称为推力。现以荷载、跨径相同的简支梁与三铰拱（图1-3a）作受力分析，比较其跨内任意截面处的内力有什么不同。

图中： H 、 y ——推力、推力至截面重心距离；

V_A^0 、 Q^0 、 M^0 ——梁的反力、剪力、弯矩。

$$M = M^0 - Hy$$

$$N = N' + N'' = H \cos \phi + Q^0 \sin \phi$$

$$Q = Q' + Q'' = H \sin \phi - Q^0 \cos \phi$$

式中： N ——轴向压力，为 Q^0 、 H 对拱轴切线方向投影之和；

Q ——径向剪力，为 Q^0 、 H 对垂直拱轴方向投影之和；

ϕ ——拱轴线任意处水平倾角。

从图1-3b可见，梁截面上作用有竖直剪力和较大的弯矩，梁是以受弯为主的构件。由于拱中推力的存在，拱截面上除作用有径向剪力和大为减小的弯矩外，还有较大的轴向压力，故拱是以受压为主的压弯构件，因而常利用抗压性能远比抗拉性能好的砖、石、混凝土等材料建造拱桥。从实体梁、拱的截面应力分布来看，梁有一半的截面处于受拉区，当下缘应力达到材料受拉极限时，中性轴附近的应力还很小，使得材料强度不能充分发挥，而混凝土梁还需在下缘布设抗拉钢筋。但拱因轴向压力的作用使绝大部分截面处于受压区，应力分布较梁截面均匀，因而充分地利用了材料的抗

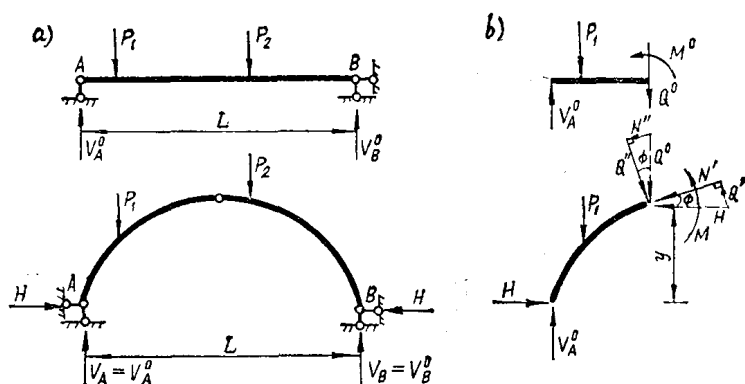


图1-3 拱与梁的受力

压性能，这就是拱比梁具有更大跨越能力的原因。

二、拱的压力线

通过拱与梁的受力分析，明确了拱是以受压为主要特点的压弯构件。为了能充分发挥砖、石、混凝土这类圬工材料的抗压性能，应尽可能减少甚至消除弯矩的影响，这就必须了解拱的压力线概念，它在拱桥的设计中是一个重要的因素

关于拱的压力线，可由下面的说明来理解：

用任一径向截面将拱分成二个隔离体，留其右边部分，作用在这个截面上的内力素为 N 、 Q 、 M （如图1-4虚线所示），代表着左边部分对右边部分的作用。将这三个力素用等效的合力 F 代换，它的数值和倾角由 Q 和 N 确定，其作用点至截面的重心距离为 $e = \frac{M}{N}$ ，称它为偏心距。 F 即为截

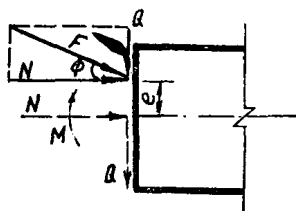


图1-4 拱截面内力

面左边所有外力（包括荷载、支点反力）的合力，亦即是左边部分对右边部分的作用。

由于各截面上的 M 、 N 均不同，故有不同的 e 值，用 $e = \frac{M}{N}$ 可分别求出拱圈各截面上的合力作用点，将这些合力作用点连接起来就可得到一条线，这条线就叫做拱的压力线。它显示出拱圈在外力作用下，内部产生的压力所经过的途径。如系三铰拱，压力线必经过两端和跨中的铰，因这些铰处的 $M = 0$ ，即 $e = 0$ 。

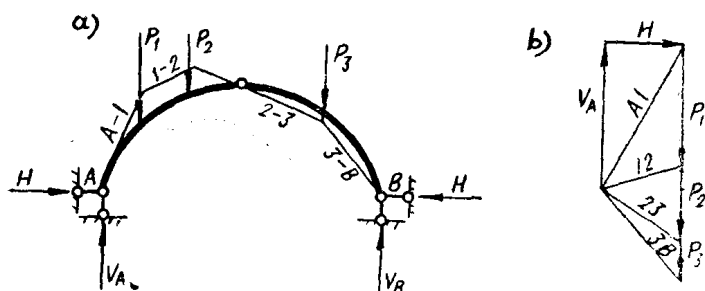


图1-5 拱的压力线与力多边形

图1-5a中作出了三铰拱在集中荷载作用下所产生的压力线，它是用作图法按比例绘制力多边形（图1-5b）作得的。过A点作射线A1的平行线A-1（称索线）与 P_1 相交，自这点作射线12的平行线1-2与 P_2 相交，依次作出由四条索线组成的折线，这条折线就是该三铰拱的压力线。压力线的每条索线代表着左边（或右边）所有外力的合力作用线；如索线A-1为 V_A 、 H 的合力作用线，索线1-2为 V_A 、 H 、 P_1 的合力作用线。合力的数值由力多边形中的射线长度来决定；如射线A1长度是 V_A 、 H 的合力数值，射线12是 V_A 、 H 、 P_1 的合力数值。

将合力 F 分解为平行和垂直于截面的二个分力，便得到径向剪力 Q 和轴向力 N （见图1-4），由此，作用在截面上的弯矩就可由 $M = Ne$ 求出。若要求矩形截面的拱圈不出现因弯矩产生的拉应力，则压力线就只能在截面对称轴上三等分中段的截面核心范围内。

三铰拱在集中荷载作用下，压力线于集中荷载处改变方向而转折，集中荷载越大，转折得就越厉害。当为连续的分布荷载作用时，可视作无限个集中荷载的作用，那么三铰拱的压力线必将是一根圆滑的曲线。这说明压力线的形状只取决于荷载的位置与其大小。压力线越和拱轴线接近，截面上的弯矩就越小，应力分布也就越均匀。如果压力线与拱轴线吻合时，各截面的 M 和 Q 都是零，而只有轴向力作用，全拱将处于无弯矩的纯压状态，此时应力沿着截面均匀分布，使圬工材料良好的抗压性能得以充分的发挥，显得经济合理。在固定荷载作用下与压力线相吻合的拱轴线称为合理拱轴线。

三铰拱、二铰拱和无铰拱在承受沿水平向均布的竖直荷载作用时，其合理拱轴线均为二次抛物线；承受沿水平向非均布的连续竖直荷载（见第四章第一节图4-1）作用时，则合理拱轴线同为悬链线。

压力线既形象地显示出拱内压力传递的途径，又可借助它求得拱的截面内力，并由此得出用压力线作为拱轴线可使拱结构受力最佳的结论，为拱桥设计中选择拱轴线型的原則提供了理论依据。

三、静定拱与超静定拱

拱式结构按其构造中所设铰的数目，可分为三铰拱，二铰拱和无铰拱。若按拱结构计算的特点划分，凡用静力学方

程式计算的称为静定拱，凡不能仅用静力学方程式计算的称为超静定拱。

从几何组成看，超静定结构是有多余联系（或称多余约束）的几何不变结构，多余联系的数目就是结构的超静定次数。从静力平衡条件看，超静定结构的未知反力超过静力平衡方程数目，超过的数值就是结构的超静定次数。这是超静定结构具有的特点，而静定结构则恰好相反。

首先分析三铰拱（图1-6a）。如果撤去左支承处的水平链杆，三铰拱会因跨中铰的存在而变成几何可变结构，说明无多余联系。三铰拱有四个未知反力（图1-6b），可通过下面的三个静力平衡方程和以半跨为隔离体后铰C处弯矩为零的一个补充方程完全求出。所以，三铰拱是静定拱。

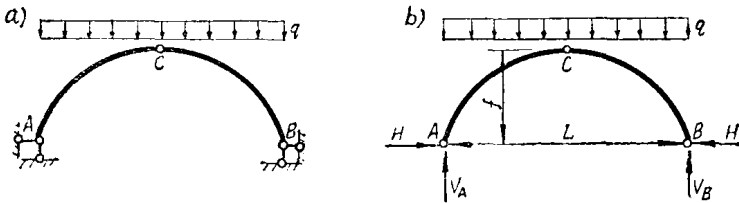


图1-6 三铰拱

$$\text{由: } \sum M_B = 0 \text{ 得: } V_A L - \frac{q l^2}{2} = 0 \quad V_A = \frac{q l}{2}$$

$$\sum Y = 0 \text{ 得: } V_B + V_A - q l = 0 \quad V_B = \frac{q l}{2}$$

$$\sum X = 0 \text{ 得: } H_A = H_B = H$$

$$\text{再由: } \sum M_C = 0 \text{ 得: } H f + \frac{q l^2}{8} - \frac{V_A l}{2} = 0 \quad H = \frac{q l^2}{8 f}$$

二铰拱（图1-7a）在两端支承处有四根链杆，如果撤去左支承处水平链杆，二铰拱就成为几何不变的静定简支曲

梁，表明这根水平链杆是多余联系。二铰拱有四个反力，由 $\Sigma M_B = 0$ ， $\Sigma Y = 0$ 可求得两端垂直反力，又由 $\Sigma X = 0$ 求得两端推力互等，但还需一个补充方程才能确定推力的数值。所以，二铰拱的反力是不能单靠三个静力平衡方程能全部求得的，因此二铰拱是一次超静定拱。图1-7b的静定结构为二铰拱的基本结构， H 表示撤去多余联系后在 A 端处的多余未知力（也称冗力或赘余力）。

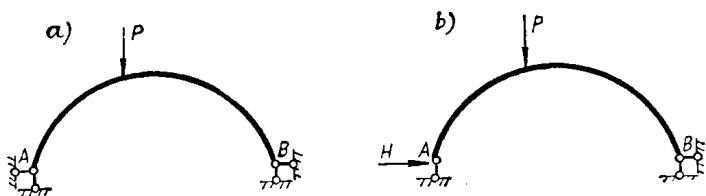


图1-7 二铰拱

无铰拱（图1-8a）的两端支承都是固结，共有六个联系（每一固结相当于三个联系），如果撤去固结，代之以三根链杆，无铰拱就成为几何不变的静定简支曲梁（图1-8b），说明有三个多余联系存在。无铰拱有六个未知反力，除三个静力平衡方程外，还需另外的三个补充方程才能全部求得。所以，无铰拱是三次超静定拱。图1-8b的静定结构为无铰拱的基本结构 H 、 M_A 及 M_B 分别表示撤去多余联系后在 A 及 B 端处的多余未知力。

要求得超静定拱的多余未知力，就必须借助变形协调条件建立起来的力法方程，这将在悬链线无铰拱计算方法一节中予以介绍。求出了全部支承反力和多余未知力后，超静定