

86.231
SYD

扁平砖拱建筑

山西省运城地区建委设计室



中国建筑工业出版社

本书在工程实践的基础上,对扁平砖拱建筑在内力分析、构造要求、建筑处理、施工技术及经济分析等方面,作了比较系统的介绍。并着重阐述了砖拱结构的抗推、抗拉体在各种边界条件下的计算、构造方法。介绍了各种型式的扁平砖拱建筑的实例。分析了此类建筑由于设计或施工不当而出现的裂缝及事故的原因。并附有实用荷载的计算表格。

本书可供建筑设计、施工人员及有关学校师生参考。

* * *

参加本书编写编有:孙芳垂、汪祖培、陈忠麟、李麟生。

扁平砖拱建筑

山西省运城地区建委设计室

*

中国建筑工业出版社出版(北京西郊百万庄)

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

中国建筑工业出版社印刷厂印刷(北京阜外南礼士路)

*

开本:850×1168毫米 1/32 印张:6³/₄ 字数:182千字

1980年8月第一版 1980年8月第一次印刷

印数:1—11,650册 定价:0.66元

统一书号:15040·3627

前 言

窑洞作为居住建筑，历史已经十分悠久了。人类最早就掘穴而居，穴就是窑洞的原始形式。嗣后，人们又依山就势掘成窑洞，一开始窑内并无衬砌，人类在与自然作斗争中认识了自然，整体山的拱形受力状态决定了窑洞的形式，这就是长期以来，半圆形窑洞给人们留下的较深印象。

当有了砖石等建筑材料以后开始修建独立的居住建筑时，仍沿用了窑洞的传统概念，围绕着半圆形作为唯一的建窑形式。虽然它是独立修建的，但仍称之为砖窑。

以前，依山就势的窑洞保温隔热的功能比较好，冬暖夏凉，深受欢迎。所以独立建窑后，有些仍沿用老的做法：例如顶部保温层采用很厚的泥土，最厚有达50厘米者，也取得保温隔热好的效果，但带来了自重大的缺点。

因此，民间大量的砖拱窑洞已经形成了固定的型式，其拱体有半圆形及桃尖形，其厚度一般是一伏一礅（18厘米），但也有二伏二礅的（37厘米）。抗推体则为厚达1.0~1.7米的砖墙。内墙厚度达37厘米。以十间砖拱窑洞为例，每间为 3.3×4.5 米，要用砖12000块，每平方米约809块，非常不经济，加上顶部覆盖泥土，结构重量很大。

同时，这种型式，在使用上受到一定限制，因为它的开间受一丈概念的束缚，使其跨度局限在3.3米以下，除去隔墙厚度，室内开间净距仅有3米左右，而且进深一般均较大，长宽比多超过2，建筑平面狭长，使用不够灵活。地面与拱脚距离一般在2米以上，从地面到拱顶，高度达3.65米，净高虽高但无开敞之感。

虽然，这类砖拱有取材容易、施工方便等优点，但毕竟造价高，使用上受限制，不能广为运用。

近年来，广大群众修建砖拱窑洞逐渐摆脱过去传统的型式，探索新的型式，逐渐地出现较平的砖拱，矢跨比为 $1/4$ 或 $1/5$ ；同时也利用钢筋混凝土构件抗推、抗拉。

这几年我们从事设计工作中，经常碰到砖拱窑洞设计的一些问题，通过不断地吸取群众的实践经验，在一些工业及民用建筑中采用了扁平砖拱的设计。它与木结构瓦屋面相比可节约木材，提高防火等级；与钢筋混凝土混合结构相比可节约钢材、水泥；与传统砖拱窑洞相比，可减轻自重，节约用砖，经济效益尤为显著；外形美观轻巧，为使用者乐于接受。近年来，一些非专业设计施工队伍，也采用这类型式作屋盖和楼板。

我们先后在传达室、办公楼、宿舍、车库、仓库、学校教室、食堂等建筑中，采用了扁平砖拱结构，跨度从 $3.1\sim 4.2$ 米，有单层平房，有两、三层楼房，也有仅用于四层楼房屋盖者。

这类建筑虽然运用较广，但还不能说人们已对它有了深刻的理解，所以偶尔也由于设计与施工不当而出现一些问题。本书简略地叙述了砖拱的受力性能、抗推、抗拉结构的作用、施工要求及简单的计算和建筑实例并分析了个别的工程事故等。俾使对这类建筑有兴趣的同志参考。由于我们对这类建筑应用还不广，针对存在的问题进行系统研究不够，还需要不断地向群众学习，因此本书未必能起到预期的作用，谬误之处在所难免，希读者指正。

本书在编写过程中，曾得到许多单位及同志的大力支持和帮助，谨此致谢。

目 录

前 言

第一章 拱的内力分析	1
第一节 三种常用的拱轴曲线公式	2
第二节 三种拱曲线型式	5
第三节 三种拱的内力计算	7
第四节 抛物线扁平拱	14
第五节 拱在各种荷载下的变形状态及计算表格	16
第六节 砖拱的强度计算	20
第二章 抗推、抗拉、抗震	29
第一节 抗推	32
第二节 抗拉	53
第三节 抗震	55
第三章 设计构造	65
第四章 施工	70
第一节 概述	70
第二节 材料	71
第三节 准备工作	72
第四节 施工方法	80
第五节 脱模	84
第六节 注意事项	85
第五章 建筑处理	88
第一节 屋盖	88
第二节 楼板	91
第三节 檐口	92
第四节 音响	94
第六章 经济分析	96
第七章 砖拱建筑裂缝及事故分析	100
第八章 建筑实例	107

附 录

- 一、砖砌体的物理和力学性质130
- 二、抛物线型拱在几种荷载作用下的内力系数137

第一章 拱的内力分析

从结构力学的观点上来看,拱的内力分析是比较成熟的一门学科。从理论推导、公式建立,人们都曾做了大量工作。编制的计算表格也较为丰富。在一般的情况下,内力的计算是比较简便的。

本章所写拱的内力分析,系利用既有的理论对几种常用的拱的型式作些分析对比,从而使我们对拱的受力状态有进一步的了解,有利于选用扁平拱。

在介绍几种拱轴曲线之前,先简述一下拱体在外力作用下的压力线概念。

图1-1为两铰拱受 P_1 、 P_2 、 P_3 …… P_5 垂直荷载的作用。它的支座各有水平与垂直反力 H_A 、 V_A 、 H_B 、 V_B ,其合力分别为 R_A 、 R_B 。

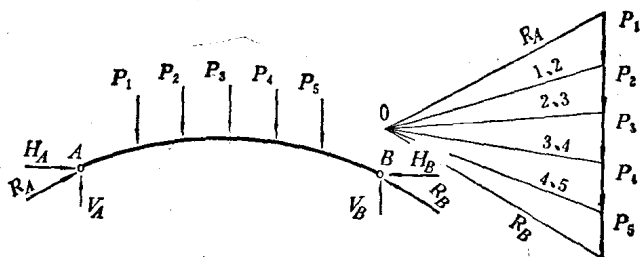


图 1-1

作用在拱体上的外力, R_A 、 P_1 、 P_2 、 P_3 、 P_4 、 P_5 、 R_B 是一个平衡体系。从左到右按顺序可以画出闭合的力多边形。

R_A 、 R_B 之交点 O 为极点,由此画出射线1、2, 2、3, ……4、5,这一射线表示每一外力作用点的左边全部合力作用的方向与数量。

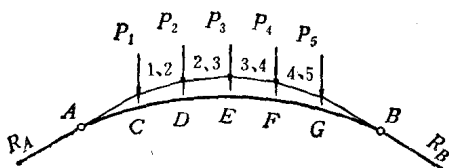


图 1-2

由图 1-2 通过支座 A 、沿 R_A 作用线与 P_1 相交于 C 点，自 C 点作射线 1、2 的平行线与 P_2 交于 D 点……，如此前进，最后与 R_B 作用线吻合。构成 $ACDEFGB$ 多边形。每段平行线称之为索线。索线组合的多边形称之为索多边形，也称之为合力多边形。

对于一个拱体来说，合力多边形也叫作压力线。

压力线对砖拱的设计是很重要的概念。压力线位置决定砖拱截面受力的状态。如矩形截面、压力线若不超过截面的核心，即截面的中央三分之一部分，截面将不致出现拉力。

所以对拱的设计来说，存在着选择合理的轴线问题，如拱的压力线与拱的轴线重合时，各截面的弯矩为零，拱处于无弯矩状态。此时各截面只受轴向力作用，压力 S 沿截面均匀分布，可以更有效地发挥材料的受力性能。

然而，在一般较小跨度的砖拱设计中，荷载类型多，又有活荷载的作用，但数值都不大，没有必要根据不同跨度、不同荷载去确定压力线，从而去选择合理轴线。过去沿用的圆弧线的拱型主要是传统习惯。抛物线型拱则是在水平均布竖向荷载作用下，其压力线为抛物线。而倒悬链线拱则是在沿弧线自重作用下与压力线吻合，整个截面不产生弯矩，这三种曲线各有其特点。

第一节 三种常用的拱轴曲线公式

在拱建筑中，常用的拱轴曲线有抛物线、圆弧线和倒悬链线等三种。

一、抛物线拱轴线 抛物线拱轴线的曲线方程为：

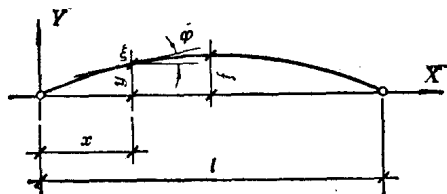


图 1-3

$$y = \frac{4fx}{l^2}(l-x) \quad (1-1)$$

式中 f ——矢高；

l ——拱跨。

拱轴线上任一点 ξ (x, y) 处的斜率为：

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{4f}{l} \left(1 - \frac{2x}{l} \right) = \frac{4f}{l} (1 - 2\xi) \quad (1-2)$$

式中 $\xi = \frac{x}{l}$ 。

二、圆弧线拱轴线 圆弧线拱轴线的曲线方程为：

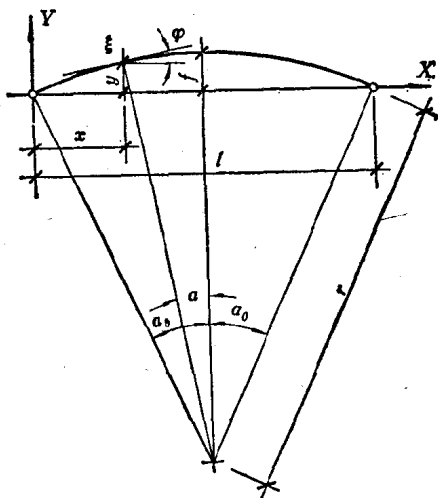


图 1-4

$$x = \frac{l}{2} - r \sin \alpha \quad (1-3)$$

$$y = r \cos \alpha - r \cos \alpha_0 \quad (1-4)$$

$$f = r(1 - \cos \alpha_0) \quad (1-5)$$

拱轴上任一点 $\xi(x, y)$ 的斜率为:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\xi - \frac{1}{2}}{\sqrt{m^2 - \left(\xi - \frac{1}{2}\right)^2}} \quad (1-6)$$

式中 $m = \frac{r}{l}$;

r ——圆弧半径。

三、倒悬链线拱轴线 悬链线是一根链条或绳索由于自重下垂所成的曲线。倒悬链线就是将悬链线反转过来向上而成的拱形曲线。

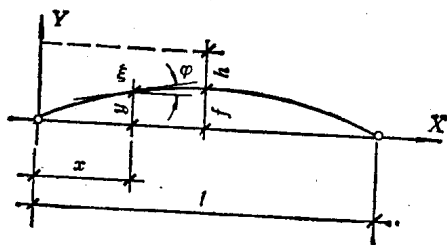


图 1-5

倒悬链线的曲线方程为:

$$y = f + h - h \cosh \left(\frac{l - 2x}{2h} \right) \quad (1-7)$$

矢高

$$f = h \left(\cosh \frac{l}{2h} - 1 \right) \quad (1-8)$$

拱轴曲线长度

$$s = 2h \sinh \frac{l}{2h} \quad (1-9)$$

拱轴上任一点 $\xi(x, y)$ 的斜率

$$\operatorname{tg} \varphi = \sinh \left(\frac{l - 2x}{2h} \right) \quad (1-10)$$

第二节 三种拱曲线型式

前节列举了三种拱轴曲线公式, 根据不同的矢跨比 $\left(\frac{f}{l}\right)$, 可以求得它们的纵座标与横座标的关系:

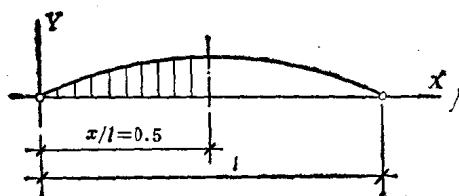


图 1-6

一、抛物线拱轴线 抛物线拱轴线与其他两种型式的拱不同, 它的轴线纵、横座标的关系与矢跨比无关。纵座标根据不同的矢高值而异。系数见表1-1。

抛物线拱轴线纵座标 y 值

表1-1

$\frac{x}{l}$	0.00	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35	0.40	0.45	0.50	乘 数
y	0.00	0.19	0.36	0.51	0.64	0.75	0.84	0.91	0.96	0.99	1.00	f

二、圆弧线拱轴线 圆弧线拱轴线纵、横座标的关系随 $\frac{f}{l}$ 值不同而异。系数见表1-2。

三、倒悬链线拱轴线 倒悬链线拱轴线纵、横座标的关系与圆弧曲线一样, 它们的系数关系亦随 $\frac{f}{l}$ 不同而异。系数见表1-3。

圆弧线拱轴线纵座标 y 值

表1-2

$\frac{x}{l} \backslash \frac{f}{l}$	0.00	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25
$\frac{1}{5}$	0.00	0.217	0.398	0.549	0.675	0.778
$\frac{1}{6}$	0.00	0.208	0.386	0.538	0.665	0.770
$\frac{1}{8}$	0.00	0.200	0.374	0.526	0.654	0.761
$\frac{1}{10}$	0.00	0.196	0.369	0.520	0.649	0.757

$\frac{x}{l} \backslash \frac{f}{l}$	0.30	0.35	0.40	0.45	0.50	乘数
$\frac{1}{5}$	0.859	0.921	0.965	0.991	1.000	f
$\frac{1}{6}$	0.854	0.918	0.964	0.991	1.000	f
$\frac{1}{8}$	0.847	0.915	0.962	0.990	1.000	f
$\frac{1}{10}$	0.845	0.913	0.961	0.989	1.000	f

倒悬链线拱轴线纵座标 y 值

表1-3

$\frac{x}{l} \backslash \frac{f}{l}$	0.00	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25
$\frac{1}{5}$	0.00	0.1974	0.3710	0.5219	0.6509	0.7589
$\frac{1}{6}$	0.00	0.1937	0.3679	0.5185	0.6478	0.7564
$\frac{1}{8}$	0.00	0.1930	0.3646	0.5150	0.6446	0.7537
$\frac{1}{10}$	0.00	0.1918	0.3629	0.5132	0.6428	0.7523

续表

$\frac{x}{l}$ $\frac{f}{l}$	0.30	0.35	0.40	0.45	0.50	乘数
$\frac{1}{5}$	0.8464	0.9139	0.9618	0.9905	1.000	f
$\frac{1}{6}$	0.8446	0.9128	0.9613	0.9904	1.000	f
$\frac{1}{8}$	0.8426	0.9119	0.9607	0.9902	1.000	f
$\frac{1}{10}$	0.8417	0.9108	0.9605	0.9901	1.000	f

从以上所列数值可以看出, 虽然三种拱轴曲线公式的型式差异很大, 但从它们纵、横座标值看, 曲线型式还是比较接近的。特别是倒悬链线轴线与抛物线非常相近。当

$\frac{f}{l} = \frac{1}{10}$ 时两者差异极微。

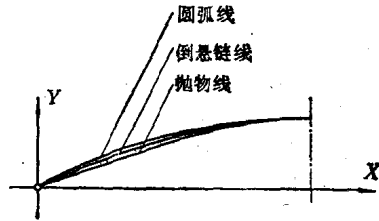


图 1-7 三种拱轴曲线

下面列举三种曲线来比较它们的差异。

第三节 三种拱的内力计算

拱运用于砖结构, 它的支座或者作为无铰来考虑, 或者作为两铰来考虑, 有时在拱中央也按一个铰点来考虑, 此时则称之为三铰拱。

三铰拱为静定结构, 两铰拱为一次静不定结构, 而无铰拱则为三次静不定结构。

静定结构可以用一般三个基本静力方程解其全部内力。三个基本静力方程为:

$$\sum V = 0, \sum H = 0, \sum M = 0 \quad (1-11)$$

一次或三次静不定结构, 三个基本静力方程还不能解决它的

内力，必须借助于结构的变形条件来解决它的赘余未知力。只要赘余未知力求得解答，其它内力之求算则极为简易。

在通常的情况下，砖拱是按两铰拱进行计算的。

由于抛物线型拱及圆弧线型拱运用较为广泛，不少书籍对它们的内力计算都作过详尽的介绍，并编制了计算表格，所以选用起来甚为方便。

倒悬链线型拱则由于它运用不广，以前对这类型拱所作工作不及前二者深细。因而也影响我们选用这种形式的拱。

如式(1-7)、(1-8)、(1-9)倒悬链线拱轴线公式为：

$$y = f + h - a \cosh\left(\frac{l-2x}{2h}\right)$$

$$f = h\left(\cosh\frac{l}{2h} - 1\right)$$

拱轴曲线长度：

$$s = 2h \sinh\frac{l}{2h}$$

在下列矢跨比的情况下， a 与 s 之值见表1-4。

倒悬链线拱 a 值及弧长 s 值

表1-4

$\frac{f}{l}$	$\frac{1}{5}$	$\frac{1}{6}$	$\frac{1}{8}$	$\frac{1}{10}$	乘 数
h	0.65587	0.77633	1.02018	1.26052	l
s	1.0997	1.0706	1.0405	1.0260	l

若为倒悬链线两铰拱，如在沿拱轴线的均布荷载 g_0 作用下，拱脚的推力为：

$$H = hg_0$$

式中 H ——水平推力，

g_0 ——沿拱轴曲线的均布荷载。

在任一截面处，拱的轴向力则为：

$$N = \frac{H}{\cos\varphi} = \frac{hg_0}{\cos\varphi} \quad (1-12)$$

现利用既有计算表格和公式，将三种型式的拱内力状态作一

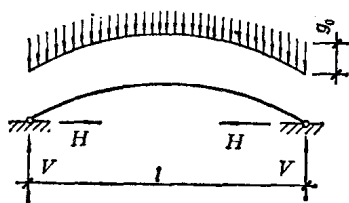


图 1-8

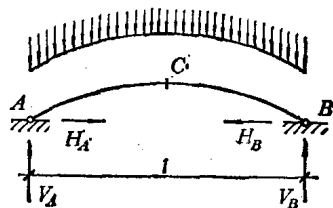


图 1-9

些对比和分析。

一、沿拱轴线作用着均布荷载 q_0 时，三种拱型的内力。

当 $\frac{f}{l} = \frac{1}{10}$ 及 $\frac{1}{5}$ 时，拱脚推力 H_A 及拱中央弯矩 M_C 见表1-5。

沿拱轴线均布荷载作用下 H_A 及 M_C 值

表1-5

$\frac{f}{l}$	H_A 或 M_C	抛物线拱	圆弧线拱	倒悬链线拱
$\frac{1}{10}$	H_A	$1.26834g_0l$	$1.25285g_0l$	$1.26052g_0l$
	M_C	$-0.00022g_0l^2$	$0.00047g_0l^2$	0
$\frac{1}{5}$	H_A	$0.65840g_0l$	$0.643945g_0l$	$0.65587g_0l$
	M_C	$-0.00083g_0l^2$	$0.00208g_0l^2$	0

从表1-5可以看出，当沿拱轴线作用着均布荷载时，三种拱的推力都非常接近。圆弧线拱的推力在三者之中略小些。拱中央的弯矩则有质的变化。倒悬链线拱的特点就是在沿拱轴线自重的作用下弯矩等于零。而圆弧线拱在中央为正弯矩，抛物线拱则为负弯矩。从表1-6看，两种矢跨比沿弧线荷重抛物线拱和圆弧

沿拱轴线均布荷载作用下 M_{max} 值

表1-6

$\frac{f}{l}$		抛物线拱	圆弧线拱	乘 数
$\frac{1}{10}$	ξ	± 0.40	± 0.40	g_0l^2
	M_{max}	$+0.00028$	-0.00030	
$\frac{1}{5}$	ξ	± 0.40	± 0.40	g_0l^2
	M_{max}	$+0.00104$	-0.00261	

线拱最大弯矩值。其最大弯矩值出现在 $\xi = \pm 0.40$ 处。

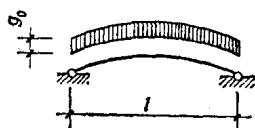
以上说明：不同拱型、不同矢高、虽在同一种荷载作用下，最大弯矩的量和质（正或负）要随之而变。

二、几种不同矢跨比的圆弧线拱与抛物线拱内力分析。

列举几种矢跨比的圆弧线拱与抛物线拱在不同荷载下的受力状态，分别列在表1-7~1-14中。

（一）圆弧线拱

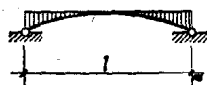
1. 沿拱轴作用的自重 g_0



圆弧线拱沿拱轴作用自重时的 M 、 N 、 e_0 表1-7

$\frac{f}{l}$	$\frac{1}{10}$	$\frac{1}{8}$	$\frac{1}{6}$	乘 数
ξ	± 0.40	± 0.40	± 0.40	
M	-0.000603	-0.000989	-0.001796	$g_0 l^2$
N	1.32533	1.09344	0.87314	$g_0 l$
e_0	-0.000455	-0.000905	-0.002060	l

2. 填充荷载（填料容重 g_1 ）

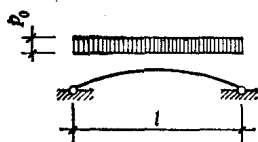


圆弧线拱在填充荷载作用时的 M 、 N 、 e_0 表1-8

$\frac{f}{l}$	$\frac{1}{10}$	$\frac{1}{8}$	$\frac{1}{6}$	乘 数
ξ	± 0.40	± 0.4	± 0.40	
M	0.000338	0.000421	0.000509	$g_1 l^3$
N	0.02459	0.02505	0.02580	$g_1 l^2$
e_0	0.01375	0.01680	0.01975	l

注： g_1 ——填料容重。

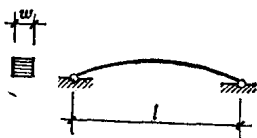
3. 垂直均布荷载 (p_0)



圆弧线拱在垂直均布荷载作用时的 M 、 N 、 e_0 表1-9

$\frac{f}{l}$	$\frac{1}{10}$	$\frac{1}{8}$	$\frac{1}{6}$	乘 数
ξ	± 0.40	± 0.40	± 0.40	
M	-0.000892	-0.001410	-0.002514	$p_0 l^2$
N	1.30565	1.06869	0.83943	$p_0 l$
e_0	-0.000684	-0.001320	-0.002990	l

4. 水平均布荷载 (w)



圆弧线拱在水平均布荷载作用时的 M 、 N 、 e_0 表1-10

$\frac{f}{l}$	$\frac{1}{10}$	$\frac{1}{8}$	$\frac{1}{6}$	乘 数
ξ	+0.40	+0.40	+0.40	
M	0.13358	0.14378	0.14425	$w f^2$
N	-0.34177	-0.35256	-0.35585	$w f$
e_0	-0.40548	-0.40781	-0.40536	f

(二) 抛物线拱

1. 沿拱轴线作用的自重 (g_0)