

Qiaoliang Jisuan Shiliji

桥梁计算示例集

拱 桥(一)

王国鼎 主编
陈祥宝 主审

人民交通出版社

前 言

《桥梁计算示例集》是结合近年来我国公路桥梁建设实践中出现的新内容，并根据1985年交通部新颁的有关公路桥涵新规范而编写的，本书是桥梁计算示例集中的一个分册——《拱桥(一)》。

本书包括拱桥方面的4个计算示例和若干个附录。

例一为等截面悬链线圬工拱桥计算示例。以净跨40m等截面悬链线石拱桥为对象，详细地介绍了等截面悬链线石拱桥、重力式桥墩、U型桥台的计算方法。在计算拱圈和重力式桥墩时，没有考虑连拱的影响。

例二为变截面悬链线圬工拱桥计算示例。书中主要介绍了变截面悬链线圬工拱桥的计算特点。其与等截面悬链线圬工拱桥相同的部分，没有在书中重复。

例三为钢筋混凝土刚架拱桥计算示例。以单孔净跨50m、净矢跨比1/10的刚架拱桥为对象，应用力法原理，比较系统地介绍了恒载、活载、桥台位移、温度变化、混凝土收缩等所引起的内力。最后介绍了截面配筋、强度验算及施工验算的方法。

例四为双曲拱桥连拱计算。以5孔等跨不等墩双曲拱桥为例，介绍了悬链线无铰连拱上、下部结构的计算步骤和方法。掌握了本例的方法之后，可以计算单孔双曲拱，亦可计算其他形式的多孔连拱——多孔石拱桥、混凝土及钢筋混凝土肋拱桥、箱形拱桥等等。

为了使读者能完全掌握“示例”中的计算公式和计算方法，将某些计算公式和图表作为附录列入，以便查阅。

本书对于从事公路桥梁工作的专业人员有一定参考价值，也可供在校学生课程设计和毕业设计时参考。

本书的例一、二由湖南大学钟圣斌编写，西安公路学院顾懋清副教授审核；例三由西安公路学院郭临义编写，重庆交通学院瞿光义副教授审核；例四由武汉城市建设学院王国鼎编写，西安公路学院陈祥宝教授审核。全书由王国鼎主编，陈祥宝教授主审。

由于编者水平有限，缺点错误在所难免，热忱欢迎读者和同行专家批评指正。

王 国 鼎

1988年6月4日于西安

内 容 提 要

本书由4个比较典型的计算示例和几个附录所组成。示例包括：等截面与变截面悬链线圬工拱桥计算示例、钢筋混凝土刚架拱桥及双曲拱桥连拱计算示例。全书叙述清楚、计算详尽，可供拱桥设计时借鉴。

桥梁计算示例集

拱 桥(一)

王国鼎 主编

陈祥宝 主审

人民交通出版社出版发行

(北京和平里东街10号)

各地新华书店经销

人民交通出版社印刷厂印刷

开本：787×1092 1/32 印张：12 字数：290千

1989年6月 第1版

1990年10月 第1版 第2次印刷

印数：9451—13450册 定价：6.05元

ISBN 7 114 00441 9

00860

目 录

例一、等截面悬链线圬工拱桥计算示例

一、设计资料	1
(一)设计标准	1
(二)材料及其数据	1
(三)设计依据	2
二、主拱圈计算	2
(一)确定拱轴系数	2
(二)拱圈弹性中心及弹性压缩系数	7
(三)主拱圈截面内力计算	7
(四)主拱圈正截面强度验算	11
(五)主拱圈稳定性验算	14
(六)主拱圈裸拱强度和稳定性验算	15
三、桥墩计算	16
(一)桥墩尺寸	16
(二)荷载计算	17
(三)强度验算	18
(四)稳定性验算	20
四、桥台计算	22
(一)桥台尺寸	22
(二)第一种受力情况验算	22
(三)第二种受力情况验算	27

例二、变截面悬链线圬工拱桥计算示例

一、设计资料	34
(一)设计标准	34
(二)材料及其数据	34
(三)计算依据	34
二、初拟上部结构尺寸	34
(一)主拱圈	34
(二)拱上结构的几何尺寸	36
三、确定拱轴系数	36
(一)拱圈恒载计算	37
(二)拱上恒载计算	37

(三)恒载对拱跨 $\frac{1}{4}$ 截面和拱脚截面产生的弯矩.....39

(四)验算拱轴系数.....39

例三、钢筋混凝土刚架拱桥

一、设计资料.....40

 (一)设计荷载.....40

 (二)桥面净空.....40

 (三)桥面纵坡 2.5%，按余弦曲线变化.....40

 (四)净跨径 $L_0=50\text{m}$ ，净矢高 $f_0=5\text{m}$ 40

 (五)材料.....40

 (六)结构尺寸如图 3-1 所示.....40

 (七)施工方案.....41

 (八)设计中，温度变化按降温 20°C 考虑.....41

 (九)设计方法及采用规范.....41

二、几何尺寸及截面特性计算.....41

 (一)桥面坡降.....41

 (二)实腹段及空腹弦杆的裸肋截面特性计算.....41

 (三)实腹段及空腹弦杆组合截面特性计算.....42

 (四)斜撑截面特性计算.....43

 (五)主拱腿截面特性计算.....43

三、恒载内力计算.....44

 (一)裸拱时的内力计算.....44

 (二)裸肋时的内力计算.....48

 (三)裸肋承受桥面恒载时的内力计算.....52

 (四)全桥恒载产生的内力计算.....56

四、活载内力计算.....62

 (一)选择基本结构.....62

 (二)计算冗力影响线.....62

 (三)计算内力影响线.....67

 (四)荷载横向分布系数计算.....79

 (五)汽车-20级引起的内力.....81

 (六)挂车-100引起的内力.....83

 (七)人群荷载引起的内力.....84

五、桥台位移、温度变化、混凝土收缩和徐变引起的内力.....91

 (一)桥台位移引起的载变位.....91

 (二)温度变化、混凝土收缩和徐变引起的载变位.....91

 (三)冗力计算.....91

 (四)内力计算.....92

六、内力（荷载）组合.....94

(一)内力提高系数.....	94
(二)内力组合.....	97
七、截面配筋及强度验算.....	99
(一)拱顶截面.....	99
(二)实腹段根部.....	101
(三)主拱腿根部截面.....	103
(四)中弦杆截面17*	105
(五)边弦杆截面21*	106
(六)斜撑上端截面21*	108
(七)各杆其它截面配筋及强度验算.....	108
八、抗剪强度验算.....	108
(一)正截面抗剪强度验算.....	108
(二)斜截面抗剪强度验算.....	110
九、裸肋无支架吊装施工验算.....	112
(一)起模时的吊装验算.....	112
(二)安装时的验算.....	114
(三)单肋合拢时的横向稳定性验算.....	117
参考资料.....	118
附录.....	118
(一)平方根法求逆矩阵.....	118
(二)常用图乘法求积分 $\int M_i M_j dx$ 的公式	122

例四、双曲拱桥连拱计算

一、设计资料.....	124
二、主拱圈截面尺寸的拟定及几何特性计算.....	125
(一)主拱圈截面尺寸的拟定.....	125
(二)主拱圈单元几何特性计算.....	126
三、拱轴系数的确定.....	128
(一)假定拱轴系数 m ，确定计算跨径及计算矢高.....	128
(二)主拱圈坐标计算.....	128
(三)桥跨结构布置及拱上立柱、横墙的高度计算.....	129
(四)恒载计算.....	130
(五)拱轴系数 m	133
四、弹性中心及弹性压缩系数.....	133
五、永久荷载（恒载）作用下的内力计算.....	134
(一)结构重力产生的内力.....	134
(二)混凝土收缩产生的内力.....	135
六、活载作用下的连拱计算.....	137

(一)拱圈弹性常数计算.....	137
(二)桥墩弹性常数计算.....	138
(三)拱中最大活载内力计算.....	142
(四)桥墩最大活载内力计算.....	146
七、温度变化引起的内力计算.....	151
八、荷载组合及拱圈强度验算.....	152
(一)荷载组合.....	152
(二)拱圈正截面强度验算.....	152
九、桥墩强度及稳定性验算.....	153
(一)恒载计算.....	153
(二)桥墩强度及基底承载力验算.....	155
(三)桥墩稳定性验算.....	156
附录一 悬链线拱上侧墙面积及重心计算表.....	157
(一)悬链线拱上侧墙面积.....	157
(二)悬链线拱上侧墙面积的重心.....	157
附录二 计算拱圈弹性常数的系数表.....	158
附录三 桥墩常变位计算公式表.....	160
附录四 无铰连拱(含固定拱)等代荷载.....	160
(一)无铰连拱内力影响线计算公式表(附表4-1).....	160
(二)无铰连拱等代荷载表(摘录).....	161
(三)无铰连拱影响线面积表(摘录).....	161
参考文献.....	184

例一、等截面悬链线圬工拱桥计算示例

一、设计资料

本示例上部结构为等跨40m的石砌板拱，下部结构为重力式墩和U型桥台，均置于非岩石土上。

(一)设计标准

1.设计荷载

汽车-20级，挂车-100，人群荷载 3kN/m^2 。

2.跨径及桥宽

净跨径 $l_0 = 40\text{m}$ ，净矢高 $f_0 = 8\text{m}$ ，净矢跨比 $\frac{f_0}{l_0} = \frac{1}{5}$ 。

桥面净宽为净7+2×(0.25+0.75m人行道)， $B_0 = 9\text{m}$ 。

(二)材料及其数据

1.拱上建筑

拱顶填料厚度， $h_d = 0.5\text{m}$ ，包括桥面系的计算厚度为 0.736m ，换算平均容重 $\gamma_1 = 20\text{kN/m}^3$ 。

拱上护拱为浆砌片石，容重 $\gamma_2 = 23\text{kN/m}^3$ 。

腹孔结构材料容重 $\gamma_3 = 24\text{kN/m}^3$ 。

主拱拱腔填料为砂、砾石夹石灰炉渣黄土，包括两侧侧墙的平均容重 $\gamma_4 = 19\text{kN/m}^3$ 。

2.主拱圈

10号砂浆砌40号块石，容重 $\gamma_5 = 24\text{kN/m}^3$ 。

极限抗压强度 $R_1^1 = 6.5\text{MPa} = 6.5 \times 10^3\text{kN/m}^2$ 。

极限直接抗剪强度 $R_1^2 = 0.33\text{MPa} = 0.33 \times 10^3\text{kN/m}^2$ 。

弹性模量 $E = 800R_1^1 = 5.2 \times 10^6\text{kN/m}^2$ 。

拱圈设计温度差为 $\pm 15^\circ\text{C}$ 。

3.桥墩

7.5号砂浆砌30号片石，材料容重 $\gamma_6 = 23\text{kN/m}^3$ 。

极限抗压强度 $R_1^1 = 3.0 \times 10^3\text{kN/m}^2$ 。

地基土为中等密实的卵石夹砂、碎石，其容许承载力 $[\sigma_0] = 500\text{kN/m}^2$ 。基础与地基间的滑动摩擦系数取 $\mu = 0.5$ 。

4.桥台

5号砂浆砌30号片石、块石，容重 $\gamma_7 = 23\text{kN/m}^3$ 。

极限抗压强度 $R_1^1 = 2.5 \times 10^3 \text{ kN/m}^2$ 。

极限直接抗剪强度 $R_1^1 = 0.24 \times 10^3 \text{ kN/m}^2$ 。

墩、台基础为15号片石混凝土， $\gamma_s = 24 \text{ kN/m}^3$ 。

台后填砂砾石土，夯实。内摩擦角 $\varphi = 35^\circ$ ，填土容重 $\gamma_0 = 18 \text{ kN/m}^3$ 。

地基条件和桥墩相同。

(三)设计依据

1.交通部标准《公路桥涵设计通用规范》，人民交通出版社，1985年。简称《桥规021》；

2.交通部标准《公路砖石及混凝土桥涵设计规范》，人民交通出版社，1985年。简称《桥规022》；

3.交通部标准《公路桥涵地基与基础设计规范》，人民交通出版社，1985年。简称《桥规024》；

4.《公路设计手册——拱桥》上、下册，人民交通出版社，1978年。简称《拱桥》。

二、主拱圈计算

(一)确定拱轴系数

拱轴系数 m 值的确定，一般采用“五点重合法”，先假定一个 m 值，定出拱轴线，拟定上部结构各种几何尺寸，计算出半拱恒载对拱脚截面形心的弯矩 ΣM_1 和自拱顶至 $\frac{l}{4}$ 跨

的恒载对 $\frac{l}{4}$ 跨截面形心的弯矩 $\Sigma M_{\frac{l}{4}}$ 。其比值 $\frac{\Sigma M_{\frac{l}{4}}}{\Sigma M_1} = \frac{y_{\frac{l}{4}}}{f}$ 。求得 $\frac{y_{\frac{l}{4}}}{f}$ 值后，可由 $m =$

$\frac{1}{2} \left(\frac{f}{y_{\frac{l}{4}}} - 2 \right)^2 - 1$ 中反求 m 值，若求出的 m 值与假定的 m 值不符，则应以求得的 m 值作为假定值，重复上述计算，直至两者接近为止。

1.拟定上部结构尺寸

(1)主拱圈几何尺寸

①截面特性

截面高度 $d = m \cdot K \cdot \sqrt[3]{l_0} = 4.8 \times 1.2 \times \sqrt[3]{4000} = 91.4343 \text{ cm}$ ，取

$$d = 0.9 \text{ m}$$

主拱圈横桥向取1m单位宽度计算，横截面面积 $A = 0.9 \text{ m}^2$ ，

惯性矩 $I = \frac{1}{12} d^3 = 0.06075 \text{ m}^4$ ，

截面抵抗矩 $W = \frac{1}{6} d^2 = 0.135 \text{ m}^3$ ，

截面回转半径 $\gamma_w = \frac{d}{\sqrt{12}} = 0.2598 \text{ m}$ 。

$$\sqrt{\frac{I}{A}}$$

②计算跨径和计算矢高

假定 $m = 2.814$ ，相应的 $\frac{y_1}{f} = 0.21$ 。查“拱桥”表(III)—20(8)得

$\sin\varphi_j = 0.70097, \cos\varphi_j = 0.71319$

计算跨径 $l = l_0 + d \cdot \sin\varphi_j = 40 + 0.9 \times 0.70097 = 40.63087\text{m}$;

计算矢高 $f = f_0 + \frac{d}{2} \times (1 - \cos\varphi_j) = 8 + \frac{0.9}{2} \times (1 - 0.71319) = 8.1291\text{m}$ 。

③拱脚截面的投影

水平投影 $x = d \cdot \sin\varphi_j = 0.63087\text{m}$;

竖向投影 $y = d \cdot \cos\varphi_j = 0.6419\text{m}$ 。

④计算主拱圈坐标 (图1-1)

将拱圈沿跨径24等分，每等分长

$\Delta l = \frac{l}{24} = 1.69295\text{m}$ 。以拱顶截面

形心为坐标原点，拱轴线上各截面的

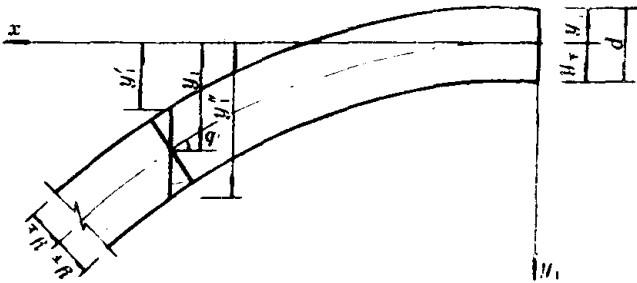


图 1-1

纵坐标 $y_1 = [\text{表(III)—1值}] \times f$ ，相应拱背坐标 $y'_1 = y_1 - \frac{d}{2\cos\varphi_j}$ ，相应拱腹坐标 $y''_1 = y_1 + \frac{d}{2\cos\varphi_j}$ 。其数值见表1-1。

主拱圈截面坐标表 表1-1

截面号	y_1/f	y_1	$\cos\varphi$	$\frac{d}{2\cos\varphi}$	$y_1 - \frac{d}{2\cos\varphi}$	$y_1 + \frac{d}{2\cos\varphi}$	x
1	2	3	4	5	6	7	8
0	1.00000	8.1290645	0.71319	0.63097	7.49809	8.76003	20.31544
1	0.810048	6.58493	0.76431	0.58877	5.99616	7.17370	18.62248
2	0.647289	5.26185	0.81100	0.55487	4.70698	5.81672	16.92953
3	0.508471	4.13339	0.85238	0.52793	3.60546	4.66132	15.23658
4	0.390820	3.17700	0.88800	0.50676	2.67024	3.68376	13.54362
5	0.291988	2.37359	0.91782	0.49029	1.88330	2.86388	11.85067
6	0.210000	1.70710	0.94212	0.47765	1.22945	2.18475	10.15772
7	0.143218	1.16423	0.96137	0.46808	0.69615	1.63231	8.46477
8	0.090308	0.73412	0.97614	0.46100	0.27312	1.19512	6.77181
9	0.050213	0.40818	0.98696	0.45595	-0.04777	0.86413	5.07386
10	0.022133	0.17992	0.99433	0.45257	-0.27265	0.63249	3.38591
11	0.005506	0.04476	0.99860	0.45063	-0.40587	0.49539	1.69295
12	0	0	1.00000	0.45	-0.45000	0.45000	0

注：第2栏由《拱桥》附录(III)表(III)-1查得；
第4栏由《拱桥》附录(III)表(III)-20(8)查得。

注：• 本例中出现的〔表(III)-Δ值〕或〔表(III)-Δ(Δ)值〕均为《拱桥》下册相应表格的数值。

(2) 拱上构造尺寸

① 腹拱圈

腹拱圈为10号砂浆砌30号粗料石等截面圆弧拱，截面高度 $d' = 0.3\text{m}$ ，净跨径 $l' = 3\text{m}$ ，净矢高 $f' = 0.6\text{m}$ ，净矢跨比 $f'/l' = 1/5$ 。查《拱桥》上册表3-1得

$\sin\varphi_0 = 0.689655, \cos\varphi_0 = 0.724138$

水平投影 $x' = d' \sin\varphi_0 = 0.2069\text{m}$

竖向投影 $y' = d' \cos\varphi_0 = 0.2172\text{m}$

② 腹拱墩

腹拱墩采用7.5号砂浆砌30号块石的横墙，厚0.8m。在横墙中间留出上部为半径 $R = 0.5\text{m}$ 的半圆和下部高为 R 宽为 $2R$ 的矩形组成的检查孔。

腹拱的拱顶拱背和主拱圈的拱顶拱背在同一水平线上。从主拱圈拱背至腹拱起拱线之间横墙中线的高度 $h = y_1 + \frac{d}{2} \left(1 - \frac{1}{\cos\varphi_1}\right) - (d' + f')$ ，其计算过程及其数值见表1-2。

腹拱墩高度计算表 表1-2

项 目	x	ξ	$k\xi$	$y_1 = \frac{f}{m-1} (\text{ch} k\xi - 1)$	$\text{tg}\varphi = \frac{2fk}{(m-1)l} \text{sh} k\xi$	$\cos\varphi = \frac{1}{\sqrt{\text{tg}^2\varphi + 1}}$	h
1*横墙	17.23087	0.84817	1.43728	5.48245	0.74230	0.80296	4.4720
2*横墙	13.43087	0.66112	1.12031	3.11894	0.51203	0.89010	2.0955
3*拱座	9.92742	0.48866	0.82807	1.62626	0.34614	0.94499	0.6681
空、实腹段分界线	9.82397	0.48357	0.81945	1.59068	0.34176	0.94627	0.6339

注：横墙高度也可根据表1-1的有关数值内插计算得到。

2. 恒载计算

恒载分主拱圈、拱上空腹段、拱上实腹段三部分进行计算。不考虑腹拱推力和弯矩对主拱圈的影响。其计算图式见图1-2。

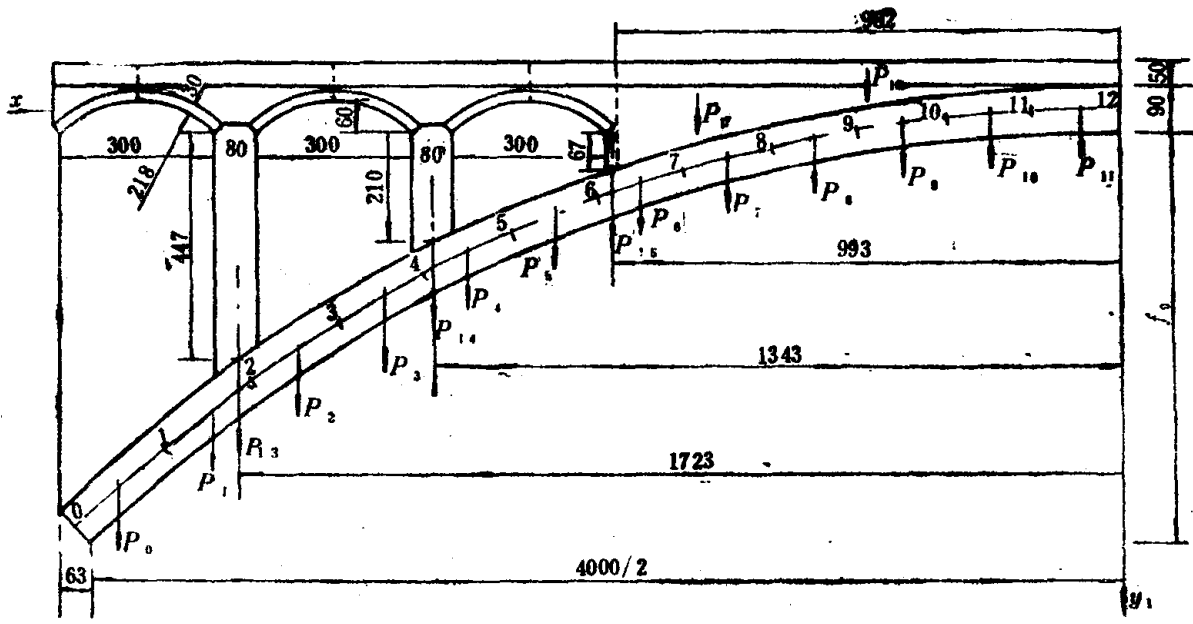


图 1-2

(1) 主拱圈恒载

$$P_{0-12} = [\text{表(III) - 19(8)值}] A \gamma_5 l = 0.55288 \times 0.9 \times 40.63087 \times 24 = 485.2223 \text{ kN}$$

$$M_{1/4} = [\text{表(III) - 19(8)值}] \frac{A \gamma_5 l^2}{4} = 0.12614 \times 0.9 \times 40.63087^2 \times 24 / 4$$

$$= 1124.4984 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$M_j = [\text{表(III) - 19(8)值}] \frac{A \gamma_5 l^2}{4} = 0.52303 \times 0.9 \times 40.63087^2 \times 24 / 4$$

$$= 4662.6477 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

(2) 拱上空腹段的恒载

① 腹孔上部 (图1-3)

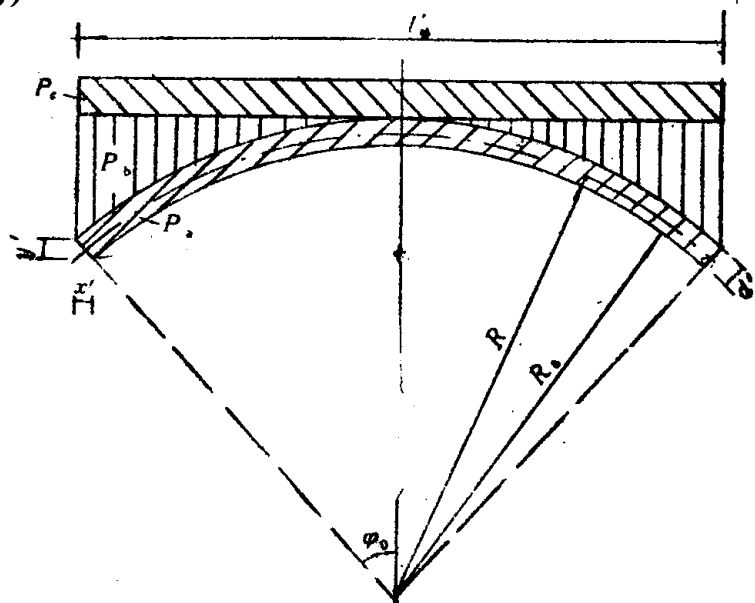


图 1-3

腹拱圈外弧跨径 $l'_{\text{外}} = l' + 2d' \sin \varphi_0 = 3.4138 \text{ m}$

腹拱内弧半径 $R_0 = 0.725001 l' = 2.1750 \text{ m}$

腹拱圈重 $P_s = 1.52202 \left(R_0 + \frac{d'}{2} \right) d' \gamma_3 = 25.4786 \text{ kN}$

腹拱侧墙护拱重 $P_b = 0.11889 (R_0 + d')^2 \gamma_2 = 16.7503 \text{ kN}$

(以上三个系数依次分别查《拱桥》上册表3-1、表1-10、表1-9)

填料及路面重 $P_o = l'_{\text{外}} h_d \gamma_1 = 50.2511 \text{ kN}$

两腹拱之间起拱线以上部分的重量 (图1-4)

$$P_d = (0.8 - x') y' \gamma_3 + [(f' + d' - y') \gamma_2 + h_d \gamma_1] (0.8 - 2x')$$

$$= (0.8 - 0.2069) \times 0.2172 \times 24 + [(0.6 + 0.3 - 0.2172) \times 23 + 0.736 \times 20] \times (0.8 - 2 \times 0.2069) = 14.8416 \text{ kN}$$

一个腹拱重 $P = \sum P = 25.4786 + 16.7503 + 50.2511 + 14.8416 = 107.3216 \text{ kN}$

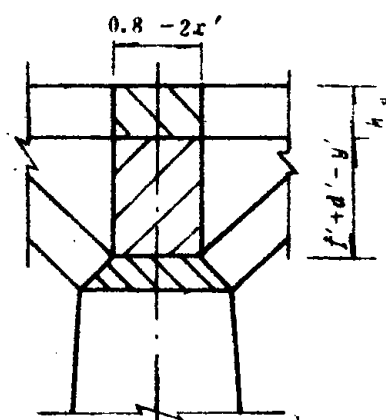


图 1-4

② 腹孔下部

1*横墙 $P = [4.4720 - (0.5 + \pi \times 0.5^2/2)/9] \times 0.8 \times 24 = 83.9580\text{kN}$

2*横墙 $P = [2.0955 - (0.5 + \pi \times 0.5^2/2)/9] \times 0.8 \times 24 = 38.3292\text{kN}$

3*拱座 $P = \left(0.6681 + \frac{1}{2} \times 0.2172\right) \times 0.2069 \times 24 = 3.8568\text{kN}$

③集中力

$P_{13} = 107.3216 + 83.9580 = 191.2796\text{kN}$

$P_{14} = 107.3216 + 38.3292 = 145.6508\text{kN}$

$P_{15} = (107.3216 - 14.8416)/2 + 3.8568 = 50.0968\text{kN}$

(3)拱上实腹段的恒载 (图1-5)

①拱顶填料及桥面重

$$P_{16} = l_x h_d \gamma_1 = 9.82397 \times 0.736 \times 20 = 144.6088\text{kN}$$

②悬链线曲边三角形部分

重量
$$P_{17} = \frac{l_1 f_1}{(m-1)K} (\text{sh} K \xi_0 - K \xi_0) \gamma_4 = 94.6523\text{kN}$$

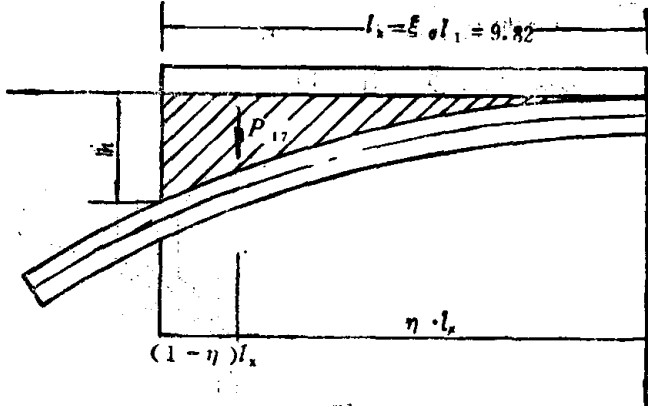


图 1-5

式中:
$$f_1 = f - y_1 \left(\frac{1}{\cos \varphi_j} - 1 \right) = 8.1291 - 0.45 \times \left(\frac{1}{0.71319} - 1 \right) = 7.9481\text{m}$$

重心位置
$$\eta l_x = \frac{\left(\text{sh} K \xi_0 - \frac{K \xi_0}{2} \right) - (\text{ch} K \xi_0 - 1)/K \xi_0}{(\text{sh} K \xi_0 - K \xi_0)} l_x = 0.75277 l_x = 7.3952\text{m}$$

(4)各块恒载对拱脚及拱跨1/4截面的力矩见表1-3

半拱恒载对拱脚和 $\frac{1}{4}$ 拱跨截面的弯矩

表1-3

分块号	恒 重 (kN)	1/4 截 面		拱 脚 截 面	
		力 臂 (m)	力 矩 (kN·m)	力 臂 (m)	力 矩 (kN·m)
P_{0-12}	485.2223		1124.4984		4662.6477
P_{13}	191.2796			$\frac{l}{2} - 17.23087 = 3.0846$	590.0211
P_{14}	145.6508			$\frac{l}{2} - 13.43087 = 6.8846$	1002.7475
P_{15}	50.0968	$\frac{l}{4} - 9.9274 = 0.2303$	11.5373	$\frac{l}{2} - 9.92742 = 10.3880$	520.4056
P_{16}	144.6088	$\frac{l}{4} - \frac{1}{2} \times 9.82397 = 5.2457$	758.5744	$\frac{l}{2} - \frac{1}{2} \times 9.82397 = 15.4035$	2227.4817
P_{17}	94.6523	$\frac{l}{4} - 7.3952 = 2.7625$	261.4770	$\frac{l}{2} - 7.3952 = 12.9203$	1222.9361
合 计	1111.5106		2156.0871		10226.2397

3. 验算拱轴系数

由表 1-3 得 $\Sigma M_{1/4} / \Sigma M_j = \frac{2156.0871}{10226.2397} = 0.21084$

该比值与假定拱轴系数 $m = 2.814$ 相应的 $y_{1/4} / f = 0.21$ 十分接近, 故可确定 2.814 为设计拱轴系数。

(二) 拱圈弹性中心及弹性压缩系数

1. 弹性中心

$y_e = [\text{表(III) - 3 值}] \cdot f = 0.333431 \times 8.1291 = 2.7105\text{m}$

2. 弹性压缩系数

$r_w^2 = \frac{I}{A} = \frac{d^2}{12} = 0.0675\text{m}^2$

$r_w^2 / f^2 = \frac{0.0675}{8.1291^2} = 0.001021454$

$\mu_1 = [\text{表(III) - 9 值}] \times \frac{r_w^2}{f^2} = 11.1272 \times 0.001021454 = 0.011366$

$\mu = [\text{表(III) - 11 值}] \times \frac{r_w^2}{f^2} = 9.18594 \times 0.001021454 = 0.009383$

$\frac{\mu_1}{1 + \mu} = 0.01126$

(三) 主拱圈截面内力计算

大跨径拱桥应验算拱顶、3/8拱跨、1/4拱跨和拱脚四个截面, 必要时应验算 1/8 拱跨截面。为节省篇幅, 本例只验算拱顶、1/4 拱跨和拱脚三个截面的内力。其余截面, 除不计弹性压缩的内力必须在影响线上直接布载求得以外, 其步骤和 1/4 拱跨者相同。

1. 恒载内力计算

计算拱圈内力时, 为了利用现有的表格, 一般采用所确定的拱轴线进行计算。但是在确定拱轴系数时, 计算得的恒载压力线与确定的拱轴线很难在“五点”完全重合, 本例中二者相差 $0.21084 - 0.21 = 0.00084$ 。当这个偏差较大时, 要用“假载法”计入其影响。本例不计偏离的影

计入弹性压缩的恒载内力 表1-4

项 目	拱 顶	1/4 截 面	拱 脚
$y = y_s - y_1$	2.7105	1.0034	-5.4186
$\cos\varphi$	1	0.94212	0.71319
$H_e = \left(1 - \frac{\mu_1}{1 + \mu}\right) H'_e$	1243.8145	1243.8145	1243.8145
$N_e = \frac{H'_e}{\cos\varphi} - \frac{\mu_1}{1 + \mu} H'_e \cos\varphi$	1243.8145	1321.9194	1753.7746
$M_e = \frac{\mu_1}{1 + \mu} H'_e \cdot y$	38.3938	14.2130	-76.7536

响。

(1) 不计弹性压缩的恒载推力

$$H'_x = \frac{\sum M_i}{f} = \frac{10226.2397}{8.1291} = 1257.9793 \text{ kN}$$

(2) 计入弹性压缩的恒载内力见表1-4

2. 活载内力计算

(1) 汽车-20级和人群荷载的内力

$$\text{单位拱宽汽车等代荷载 } K_1 = \frac{c\xi}{9} K_{20} = \frac{2}{9} K_{20}$$

式中， $c = 2$ 为车道数；

$\xi = 1$ 为车道折减系数，双车道不折减。

$$\text{单位拱宽人群等代荷载 } K_2 = \frac{2b}{9} g_{\text{人}} = \frac{2 \times 0.75}{9} \times 3 = 0.5 \text{ kN}$$

式中， $b = 0.75 \text{ m}$ 为人行道宽度；

$g_{\text{人}} = 3 \text{ kN}$ 为人群荷载。

等代荷载表说明：表列车辆等代荷载是根据 $m = 2.814$ ， $\frac{f}{l} = \frac{1}{6}$ 的等截面悬链线无

铰拱内力影响线编制的，如计算的 m 和 $\frac{f}{l}$ 与表不同时，可以用式 $K = \frac{\mu}{\mu_b} K_b + (1 + \frac{\mu}{\mu_b}) K$ 进行换算。本例只有矢跨比不同且相差不大，故不作换算而直接用表列等代荷载数值。单位拱宽的荷载计算见表1-5。

单位拱宽的计算荷载 表1-5

截 面	项 目	汽车-20级等代荷载		人群荷载	合 计
		K_{20}	$\frac{2}{9} K_{20}$		
拱 顶	M_{max}	39.7962	8.8436	0.5	9.3436
	相应 H_1	24.3593	5.4138	0.5	5.9138
	M_{min}	28.0846	6.2410	0.5	6.7410
	相应 H_1	22.0224	4.8937	0.5	5.3937
1/4 截面	M_{max}	37.1836	8.2630	0.5	8.7630
	相应 H_1	24.2719	5.3938	0.5	5.8938
	M_{min}	21.4864	4.7746	0.5	5.2746
	相应 H_1	20.4243	4.5387	0.5	5.0387
拱 脚	M_{max}	20.5117	4.5582	0.5	5.0582
	相应 H_1	18.2388	4.0531	0.5	4.5531
	相应 V	5.6009	1.2446	0.5	
	M_{min}	28.9341	6.4298	0.5	6.9298
	相应 H_1	13.4981	2.9996	0.5	3.4996
	相应 V	13.8107	3.0690	0.5	

注：汽车-20级等代荷载由《拱桥》上册第一章表1-5直线内插算得，例如拱顶的

$$M_{\text{max}} = \frac{40.63087 - 40}{45 - 40} \times (37.0 - 40.2) + 40.2 = 39.7962$$

不计弹性压缩的汽车-20级及人群内力见表1-6。

不计弹性压缩的汽车和人群内力

表1-6

截面	项 目	计算荷载	影 响 线 面 积			力或弯矩
			表(III)-14(67)值	乘数	面 积	
拱顶	M_{max}	9.3436	0.00725	l^2	11.9688	111.8316
	相应 H_1	5.9138	0.06913	l^2/f	14.0390	83.0239
	M_{min}	6.7410	-0.00456	l^2	-7.5280	-50.7460
	相应 H_1	5.3937	0.05903	l^2/f	11.9879	64.6591
1/4截面	M_{max}	8.7630	0.00882	l^2	14.5607	127.5954
	相应 H_1	5.8938	0.04035	l^2/f	8.1943	48.2957
	M_{min}	5.2746	-0.01047	l^2	-17.2846	-91.1693
	相应 H_1	5.0387	0.08781	l^2/f	17.8326	89.8529
拱脚	M_{max}	5.0582	0.01994	l^2	32.9183	166.5074
	相应 H_1	4.5531	0.09242	l^2/f	18.7688	85.4561
	相应 V	汽	1.2446	1	20.3154	25.2846
		人	0.5		6.9345	3.4673
	M_{min}	6.9298	-0.01409	l^2	-23.2607	-161.1922
	相应 H_1	3.4996	0.03575	l^2/f	7.2602	25.1076
	相应 V	汽	3.0690	1	20.3154	62.3481
		人	0.5		13.3810	6.6905

注：在求拱脚相应反力 V 时，以汽车-20级等代荷载乘以全部反力影响线面积。人群荷载反力则只乘以相应的影响线面积。

计入弹性压缩的汽车和人群荷载内力见表1-7。

(2)挂车-100的内力

《拱桥》手册无挂车-100的等代荷载表，其等代荷载 K_{100} 为挂车-80的1.25倍，故每单位拱宽的挂车-100等代荷载为

$$K_3 = \frac{1.25}{9} K_{80}$$

不计弹性压缩的挂车-100内力见表1-8。

计入弹性压缩的挂车-100内力见表1-9。

3.温度内力计算

拱圈合拢温度15℃

拱圈砌体线膨胀系数 $\alpha = 0.000008$

变化温差 $\Delta t = \pm 15^\circ\text{C}$

温度变化在弹性中心产生的水平力

$$H_t = \frac{\alpha EI \Delta t}{[\text{表(III)-5值}] f^2} = \pm \frac{8 \times 10^{-8} \times 5.2 \times 10^9 \times 0.06075}{0.099373 \times 8.1291^2} \times 15$$
$$= 5.7727 \text{ kN}$$

拱圈温度变化内力见表1-10