

拱 桥 等 代 荷 载

Gongqiao Dengdai Hezai

王国鼎 等编著

人 民 交 通 出 版 社

前 言

“拱桥等代荷载”是研究与设计无铰拱桥（含连拱及固定拱，以下同）的一本理论书和工具书，除能用于计算各种连拱之外，尚能用于计算固定拱。

现行《公路砖石及混凝土桥涵设计规范》^[10]规定，多孔拱桥的桥墩与主拱圈的抗推刚度比不大于37时，应考虑连拱作用。这无疑是正确的。多孔拱桥按连拱计算，可使材料分配比较合理。这不仅可以提高桥梁的设计质量，还能获得一定的经济效益。目前，由于缺乏连拱等代荷载（包括相应影响线面积），为了满足精度要求，计算通常比较繁琐，且不利于实践中采用。本书的主要目的在于：阐明连拱的受力特性，提供合理的简便计算方法和图表，以便推广连拱设计方法。

本书第一章通过连拱变位影响线和各种内力影响线的讨论，得出连拱在受力方面的一些共同性规律。第二章介绍连拱（含固定拱）等代荷载的编制方法。第三章介绍连拱等代荷载在其他连拱计算方法中的应用，说明利用“换算刚度法”编制的等代荷载，亦能作为其他连拱简化计算的工具。第四章结合常用桥型比较详细地介绍了连拱等代荷载的应用。第六章是各种计算用表，供简化计算连拱及固定拱之用。运用本书的成果计算连拱时，可达到提高设计工效、缩短设计周期、提高设计质量的良好效果。

在本书与读者见面的时候，作者特别要感谢湖南大学电子计算机站的罗秉钧同志。他在编排程序、上机计算方面做了大量的工作，为本书的出版作出了显著的贡献。

作者对交通部公路规划设计院袁伦一高级工程师、宁夏回族自治区交通科研所孙长生高级工程师、湖南省交通规划勘察设计院丁祖吉、李仁高级工程师、同济大学姚玲森教授、湖南大学王磊、李家宝教授、长沙铁道学院姜昭恒副教授、北京建筑工程学院李靖森讲师以及本校李泽民教授、肖运龙副教授表示衷心的感谢。这些同志对本书的编写内容、方法、提出了许多宝贵意见，使本书能以现在的面貌与读者见面。

作者对武汉城市建设学院王昌武同志致谢。他在本书定稿之后通读全文，提出了某些有益的意见。

由于作者水平有限，缺点错误在所难免，欢迎批评指正。

王国鼎

1985年3月于武汉城市建设学院

拱桥等代荷载

王国鼎 等编著

责任编辑：谢仁物

封面设计：梁毓英

插图设计：赵耀华

技术设计：乔文平

责任校对：刘素燕

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 $\frac{1}{16}$ 印张：20.5 字数：582 千

1988年2月 第1版

1988年2月 第1版 第1次印刷

印数：0001—5,500册 定价：5.50 元

内 容 提 要

本书是研究与设计无铰拱桥（含多孔连拱及单孔固定拱。下同）的一本理论书和工具书，它的基本内容都是最新的研究成果。主要包括：连拱的主要特性、基本计算理论、无铰拱桥等代荷载的编制方法、等截面悬链线无铰拱桥的等代荷载表（含汽车-超 20 级）、相应影响线面积表、影响线坐标表等等。在公路标准车辆荷载和特殊荷载作用下，均有详细的应用示例。

本书供公路、铁路、水利方面从事桥梁工作的人员使用，有关大学、中专师生从事拱桥教学时使用参考。

目 录

第一章 总 论	1
第一节 计算简图及符号规定	1
一、计算简图	1
二、符号规定	1
第二节 连拱的变位影响线和内力影响线	2
一、拱墩结点变位影响线	2
二、拱中内力影响线及其最不利布载情况	4
三、墩顶内力影响线及其最不利布载情况	5
第二章 连拱等代荷载的编制方法	10
第一节 换算刚度法的基本概念	10
第二节 换算刚度计算	11
一、换算抗推刚度和换算相干系数	11
二、换算抗弯刚度	12
第三节 连拱内力影响线及最大活载内力的计算	14
一、基本角变位移方程式	14
二、计算连拱内力的基本公式	15
三、拱中最大活载内力计算	17
四、墩顶最大活载内力计算	21
第三章 连拱等代荷载在其他连拱计算方法中的应用	24
第一节 《公路技术资料(6)》计算内力参数的公式	24
一、拱、墩弹性常数的确定	24
二、拱、墩内力的基本公式	25
三、拱中内力影响线的计算公式	27
四、换算抗推刚度的计算公式	27
五、内力参数的计算步骤	30
第二节 “ Σ 法”计算内力参数的公式	30
一、基本假定	30
二、一般连拱的计算	30
三、等跨等墩高连拱的计算	32
第四章 公路桥涵标准车辆荷载作用下, 连拱活载内力的计算	37
第一节 计算程序	37
一、拱中最大活载内力计算步骤	37
二、墩顶最大活载内力计算步骤	37
第二节 连拱内力计算及与精确解的比较	38
一、按“换算刚度法”计算	38

二、按“Σ法”计算	47
三、按《公路技术资料(6)》计算	49
四、拱、墩内力与精确解的比较	51
第三节 连拱内力及与直接布载计算结果的比较	52
一、3孔连拱(双排架高桩承台桥墩)	52
二、4孔连拱(单排架低桩承台桥墩)	57
三、5孔连拱(不等高重力式桥墩)	60
第五章 其他荷载作用下连拱活载内力的计算	66
第一节 设计资料	66
第二节 拱、墩弹性常数计算	67
一、拱圈弹性常数计算	67
二、桥墩弹性常数计算	68
第三节 拱、墩最大活载内力计算	71
一、拱中最大活载内力计算	71
二、墩顶最大活载内力计算	78
第六章 等截面悬链线无铰拱桥计算用表	83
第一节 公路桥涵标准车辆等代荷载表	83
一、几点说明	83
二、 $M_{\max}$ (或 $M_{\min}$) 及相应的 H 、 V 等代荷载表 (表6-1)	84
三、 $H_{\max}$ 及相应的 M^P 、 V 等代荷载表 (表6-2)	151
四、 $V_{\max}$ 及相应的 H 等代荷载表 (表6-3)	151
第二节 拱桥内力影响线面积表	165
一、 $M_{\max}$ (或 $M_{\min}$) 及相应的 H 、 V 影响线面积表 (表6-4)	165
二、 $H_{\max}$ 及相应的 M^P 影响线面积表 (表6-5)	165
第三节 计算连拱影响线坐标数据表 (表6-6)	165
第四节 拱桥弯矩影响线荷载长度表 (表6-7)	165
附录 多孔拱桥计算孔数的确定	316
一、多孔拱桥按固定拱计算的条件	316
二、多孔连拱计算孔数的确定	318
三、确定多孔连拱计算孔数示例	319
参考文献	320

第一章 总 论

第一节 计算简图及符号规定

一、计 算 简 图

现行连拱计算方法中，桥跨结构一般是以裸拱圈代替^[1—13]，不考虑拱上建筑与主拱圈联合作用的影响。本书提供的拱桥（包括连拱及固定拱）等代荷载（包括相应影响线面积），主要是为了简化空腹式无铰拱桥的计算手续，并提高拱、墩内力的计算精度。在计算连拱等代荷载时，采用图 1-1 所示的计算图式，以裸拱圈代替桥跨结构，没有计入拱上建筑联合作用的影响。

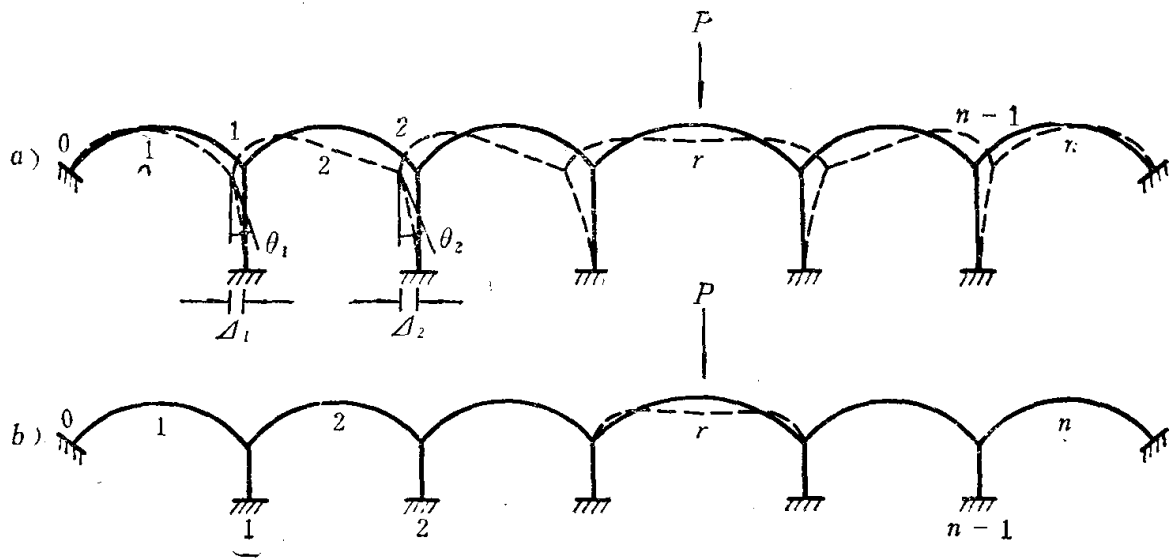


图1-1 连拱计算图式

为了减轻拱桥的自重，便于工业化施工，采用轻型的梁板式拱上建筑，逐步取代重型的拱式拱上建筑，是不可避免的发展趋势。鉴于梁板式拱上建筑受力比较明确，国内外试验研究证明，它的联合作用很小，可以不予考虑。从发展的眼光看问题，空腹式多孔拱桥采用图 1-1 所示的计算简图比较合理。

二、符 号 规 定

(一)内力符号

- 1.各孔拱中水平力（以 $H_1, H_2, \dots, H_r, \dots$ 表示）以使该孔拱圈产生压力为正；各孔拱中弯矩（以 $M_1, M_2, \dots, M_r, \dots$ 表示）以使该孔拱圈内缘受拉为正〔图1-2a〕。
- 2.各墩顶水平力（以 $\bar{H}_1, \bar{H}_2, \dots, \bar{H}_r, \dots$ 表示）以向右为正；各墩顶弯矩（以 $\bar{M}_1, \bar{M}_2, \dots, \bar{M}_r, \dots$ 表示）以顺时针转为正〔图1-2b〕。

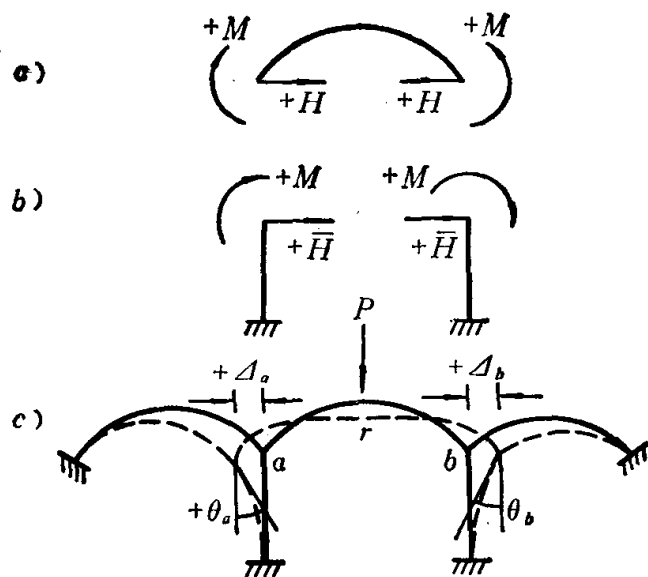


图1-2 连拱的符号规定

(二)变位符号

1.各拱墩结点的水平位移(以 $\Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_r \dots$ 表示)以远离荷载孔向河岸移动为正〔图1-2c〕。

2.各拱墩结点的转角(以 $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_r \dots$ 表示)以背离荷载孔向河岸转动为止〔图1-2c〕。

根据上述符号规定,图1-2中所示的内力和变位均为正。

第二节 连拱的变位影响线和内力影响线^①

熟悉拱墩结点的变位影响线和拱墩内力影响线,可以进一步了解连拱的某些特性,得出一些共同性规律。通过对连拱内力影响线的讨论,有利于确定拱、墩的最不利布载情况,得出拱、墩最大活载内力的合理计算方法。

图1-3~1-5为4孔30m等跨等墩连拱影响线,采用的桥墩型式有两种:一种是刚性墩^②(典型的重力式墩。墩的抗推刚度 $\bar{K}$ 是拱的抗推刚度 K 的19.4倍,即 $\frac{\bar{K}}{K} = 19.4$);另一种是柔性墩^③(桩柱式桥墩。 $\frac{\bar{K}}{K} = 0.71$)。由图可见,桥墩的型式不同,结点变位和拱墩内力的影响线亦不尽相同。为了说明连拱内力影响线与相应固定拱内力影响线的差别,在图1-4、1-5中,同时给出了相应固定拱的内力影响线,以便比较。

一、拱墩结点变位影响线

采用上述柔性墩时,4孔30m无铰连拱的结点变位影响线示于图1-3。其中图1-3b)为

① 本节所列的结点变位影响线和拱、墩内力影响线(图1-3~1-5),是采用两种方法(广义角变位移法^[4]和换算刚度法)用电子计算机平行求得的精确解。

② 本书所说的刚性墩,指具有实体墩身的桥墩(包括重力式墩及桩柱基础上加实体墩身的桥墩)。计算刚性墩时,以 $\bar{H}_{max}$ (墩顶最大水平力)控制设计。

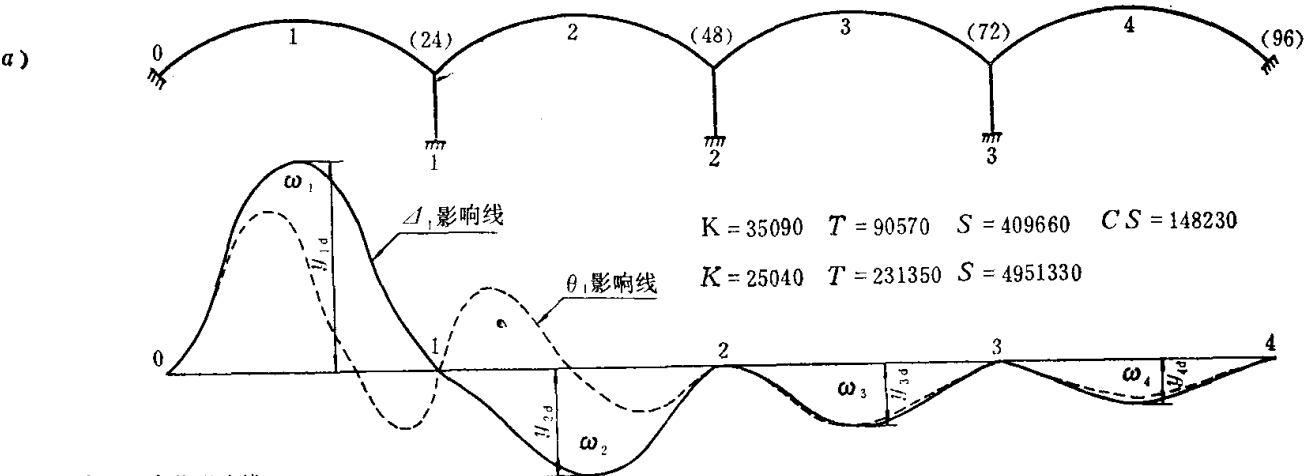
③ 本书所说的柔性墩,就是桩柱式桥墩。设计柔性墩时,一般有两种最不利布载情况:计算桩柱的下部时,以 $\bar{H}_{max}$ (墩顶水平力最大)控制设计;而计算桩柱的上部时,则以 $\bar{M}_{max}$ (墩顶弯矩最大)控制设计。

结点1的水平位移和转角影响线；图1-3c)为结点2的水平位移和转角影响线。由于本桥是等跨结构，由图可见，所有变位影响线的正、负面积均相等，每条影响线正、负面积的代数和为零。例如，在图1-3b)中，结点1水平位移 Δ_1 的影响线面积有如下关系：

$$\left. \begin{aligned} \omega_1 + \omega_2 + \omega_3 + \omega_4 &= 0 \\ \text{或 } \omega_1 &= -(\omega_2 + \omega_3 + \omega_4) \end{aligned} \right\} \tag{1-1}$$

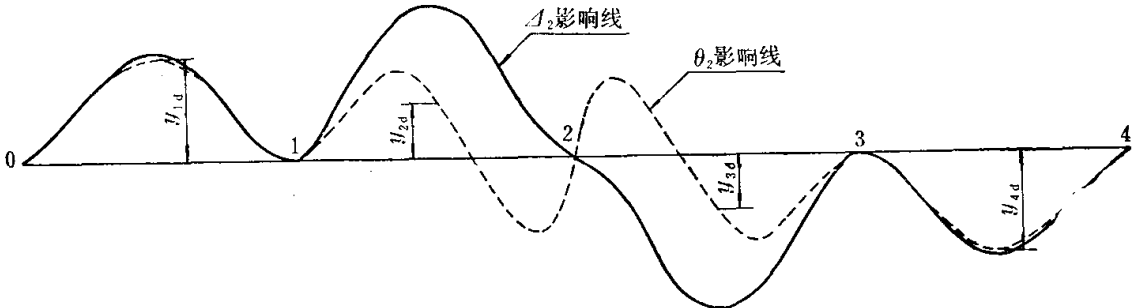
要证明上式的正确性，只需在图1-3a)的4孔等跨连拱中，同时加上均布荷载 q ，由于在这种特定荷载作用下，4孔拱桥中均无连拱作用，各拱墩结点均不产生变位。由 $\Delta_1 = q(\omega_1 + \omega_2 + \omega_3 + \omega_4) = 0$ 知：

$$\omega_1 + \omega_2 + \omega_3 + \omega_4 = 0$$



b) 结点1的变位影响线

截面号	0	6	12	18	24	30	36	42	48	54	60	66	72	78	84	90	96
$\Delta_1 \cdot 10^5$	0	1.119	1.888	1.059	0	-0.492	-0.955	-0.635	0	-0.242	-0.535	-0.361	0	-0.206	-0.398	-0.242	0
$\theta_1 \cdot 10^4$	0	4.256	5.092	-0.549	0	3.316	-0.513	-1.836	0	-1.247	-2.651	-1.788	0	-1.001	-1.928	-1.172	0



c) 结点2的变位影响线

截面号	0	6	12	18	24	30	36	42	48	54	60	66	72	78	84	90	96
$\Delta_2 \cdot 10^5$	0	0.568	0.933	0.483	0	0.877	1.352	0.698	0	-0.698	-1.352	-0.877	0	-0.483	-0.933	-0.568	0
$\theta_2 \cdot 10^4$	0	2.769	4.579	2.419	0	3.009	2.441	-2.315	0	2.315	-2.401	-3.001	0	-2.419	-4.579	-2.769	0

图1-3 拱墩结点变位影响线

同理，在图1-3的所有变位影响线中，在4孔拱桥的拱顶处，每条变位影响线4个竖标之和为零。例如，在图1-3b)、c)中，有：

$$y_{1d} + y_{2d} + y_{3d} + y_{4d} = 0 \tag{1-2}$$

要证明式(1-2)的正确性，只需在4孔等跨连拱的拱顶，同时布以集中荷载 P ，同样，在这种特定荷载情况下，各结点都不产生变位。由 $\Delta_1 = P(y_{1d} + y_{2d} + y_{3d} + y_{4d}) = 0$ 知，式(1-2)得证。

由各拱墩结点的变位影响线，可以看出如下规律性：

(一)由图 1-3b)、c)可见，结点变位影响线的竖标值，以该结点所在孔（结点左、右两孔）为最大。例如，图1-3b)中结点 1 的变位影响线，以 1、2 两孔的竖标值最大；而图 1-3c)中结点 2 的变位影响线，则以 2、3 两孔的竖标值最大，离该结点愈远的孔，影响线的竖标愈小，远到一定程度时，影响线的竖标可以小到略去不计，则荷载作用在该处时，引起结点的变位可以略去不计。

(二)由图 1-3b)可见，结点 1 的变位影响线，无论是影响线面积还是影响线竖标，均以第 1 孔为最大。即荷载作用在第 1 孔与荷载作用在其他孔相比较，结点 1 有更大的变位值。后面将会证明，对于等跨等墩、高连拱，计算 1 号墩墩顶最大水平力时，是以荷载作用在第 1 孔时为不利情况。

(三)分析变位影响线的形状，从定性上看，任意结点水平位移 Δ_i 的影响线，与相应墩顶水平力 H_i 的影响线〔图 1-5b)、c)〕形状一致，而结点转角 θ_i 的影响线，则与相应墩顶弯矩影响线〔图 1-5d)、e)〕有些类似。由图 1-3 可见，每个结点两条变位影响线之间的关系比较复杂，两者之间在数值上不成比例，不是一种简单的线性关系。

二、拱中内力影响线及其最不利布载情况

研究连拱内力影响线的主要目的在于：根据连拱内力影响线，确定拱、墩的最不利布载情况，以便计算拱、墩最大活载内力。

图 1-4 为采用两种型式的桥墩（刚性墩及柔性墩）时，拱中各截面连拱内力影响线与相应固定拱内力影响线的精确解，其中包括拱顶、拱脚、 $\frac{L}{8}$ 、 $\frac{3L}{8}$ 截面弯矩影响线、拱中水平力影响线、拱脚竖向反力影响线的精确解。对比这些影响线，不难看出，连拱内力影响线与相应固定拱内力影响线不同，采用刚性墩与采用柔性墩的连拱内力影响线也不相同。除了影响线的荷载长度不同之外，有时，影响线中最大竖标的位置也不相同〔图 1-4d)、e)〕。桥墩愈柔，连拱与固定拱内力影响线相差愈大。

应当指出，尽管连拱与相应固定拱的内力影响线不同，但在等跨连拱中，连拱内力影响线面积和与相应固定拱内力影响线的面积和（指影响线正、负面积的代数和）却是相同的。要证明这个结论，可将 4 孔等跨连拱，同时加上单位均布荷载。此时，由于作用在每个桥墩两边的水平力和弯矩，具有大小相等、方向相反的特性，因而，各个拱墩结点的变位为零，即不存在连拱的作用。在这种特定荷载作用下，按连拱计算与按固定拱计算的内力完全相等。鉴于按连拱计算与按固定拱计算的内力，都等于单位均布荷载乘以各自的影响线面积，因而，连拱影响线与固定拱影响线的面积必然相等。由于按固定拱计算的各种影响线面积可由本书的表 6-4、6-5 查得，因而，这一规律，可给连拱的内力分析提供一个已知条件，给计算工作带来某些方便。

下面根据拱中内力影响线的特点，确定最不利布载情况，以便计算拱中最大活载内力。

(一)由图 1-4b)~i)可见，计算拱脚、 $\frac{L}{8}$ 截面的最大负弯矩及拱中其他截面的最大正弯矩时，均以 1 孔（计算截面所在孔）布载为不利；计算拱脚、 $\frac{L}{8}$ 截面最大正弯矩及拱中其他截面的最大负弯矩时，均以多孔布载为不利。设计实践证明，计算拱圈时，上述 1 孔布

载与多孔布载相比较，一般以1孔布载为不利。经常控制拱圈设计的是拱顶（按 M_{max} 布载）、拱脚（按 M_{min} 布载）两个截面，多孔布载的情况，一般并不控制拱圈的设计。

（二）比较第1、2两孔拱顶弯矩影响线 M_{1d} 、 M_{2d} 〔图1-4b）、c〕知，拱顶弯矩影响线的正面积及其最大纵坐标，都是中孔比边孔大，因而，在同样荷载作用下，第2孔的拱顶正弯矩大于第1孔的拱顶正弯矩。比较第1、2两孔拱脚弯矩影响线〔图1-4d）、e〕知，拱脚弯矩影响线的负面积及其最大纵坐标，同样是中孔比边孔大，因而，在同样的荷载作用下，仍然是第2孔拱脚的负弯矩大于第1孔拱脚的负弯矩。鉴于按连拱设计时，常以拱脚负弯矩和拱顶正弯矩控制拱圈设计，因而，计算多孔等跨等墩连拱的拱中最大活载内力时，以荷载作用在中孔时为不利。这一规律，对于拱顶、拱脚以外的其他截面也是适合的。

（三）由图1-4f）、g）可见，拱中水平力影响线的竖标恒为正，这说明，无论向下的竖向荷载作用在任何位置上，拱中的水平力均为推力。由于连拱影响线的面积和与相应固定拱影响线的面积和相等，即：

在图1-4f)中

在图1-4g)中

$$\left. \begin{aligned} \omega_1 + \omega_2 + \omega_3 + \omega_4 &= \omega_1^p \\ \omega_1 + \omega_2 + \omega_3 + \omega_4 &= \omega_2^p \end{aligned} \right\} \quad (1-3)$$

式中： ω_1^p 、 ω_2^p ——按固定拱计算时，第1、2孔拱中水平力影响线面积。

由式(1-3)知，拱中水平力按固定拱计算的影响线面积 ω_1^p （或 ω_2^p ），大于连拱影响线在该孔的面积 ω_1 （或 ω_2 ）。因而，在1孔布载时，按连拱计算的水平力，总是小于按固定拱计算的水平力。这种受力状态，对桥墩很有利。

（四）由拱中弯矩影响线〔图1-4b）~e）、h）~g）〕知，控制拱圈设计的弯矩（拱脚、 $\frac{L}{8}$ 截面的负弯矩及拱中其他截面的正弯矩）值，按连拱计算均比按固定拱计算的大，而拱中水平力〔图1-4f）、g）〕按连拱计算又比按固定拱计算的小。因而，按连拱设计时，需要适当地增强拱圈，以承受较大的弯矩值。

（五）由图1-4j）知，第2孔的拱脚竖向反力影响线，在第2孔的范围内，按连拱计算与按固定拱计算几乎完全重合。因而，在第2孔布载时，该孔左、右拱脚的竖向反力，可以近似地按固定拱计算。拱脚竖向反力影响线的上述特性，也可适用于其他孔。一般而言，在第*i*孔加载时，可按固定拱计算第*i*孔的拱脚竖向反力。

三、墩顶内力影响线及其最不利布载情况

计算连拱的下部构造时，常以按 H_{max} （墩顶水平力最大）布载控制设计。仅在计算柔性墩时，需要根据 M_{max} （墩顶弯矩最大）布载，验算桥墩顶部的截面强度。

图1-5为4孔等跨连拱墩顶内力影响线与相应固定拱内力影响线。前已证明，这两种影响线面积的代数和相等。在等跨连拱中，按固定拱计算墩顶内力影响线时，它的正、负面积恒相等，影响线面积的代数和为零。由此可以推知，按连拱计算时，墩顶内力影响线面积的代数和亦为零。

（一）由图1-5b）、c）知，按连拱计算时，墩顶水平力影响线的竖标（或正、负面积），都比按固定拱计算的小。而计算桥墩时，又常以墩顶水平力最大控制设计，因而，在同样的荷载作用下，按连拱计算的墩顶水平力，亦比按固定拱计算的小。鉴于计算桥墩时，常以墩顶水平力控制设计，故按连拱设计时，可使桥墩比较轻巧，有一定的经济意义。

拱桥等代荷载

王国鼎 等编著

责任编辑：谢仁物

封面设计：梁毓英

插图设计：赵耀华

技术设计：乔文平

责任校对：刘素燕

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

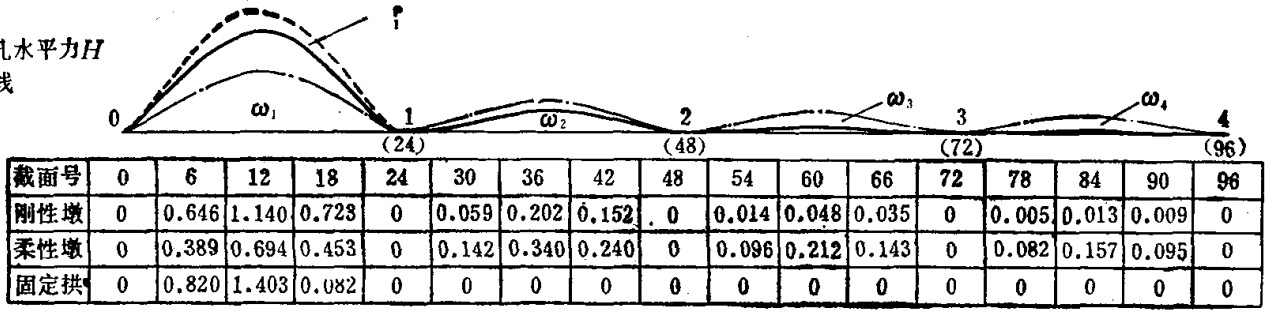
开本：787×1092 $\frac{1}{32}$ 印张：20.5 字数：582 千

1988年2月 第1版

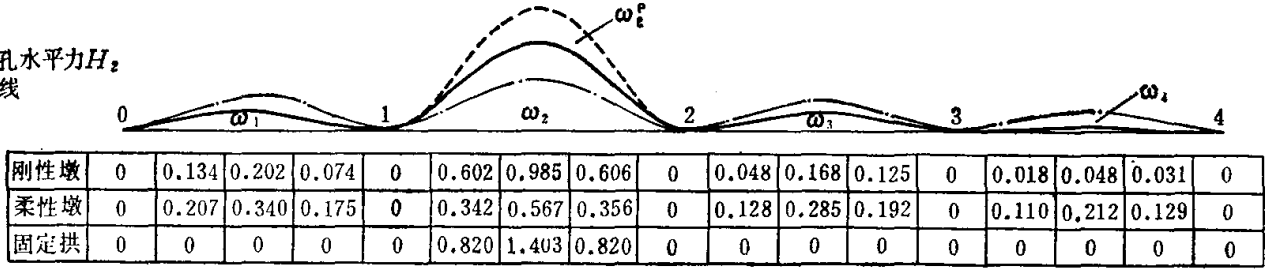
1988年2月 第1版 第1次印刷

印数：0001—5,500册 定价：5.50 元

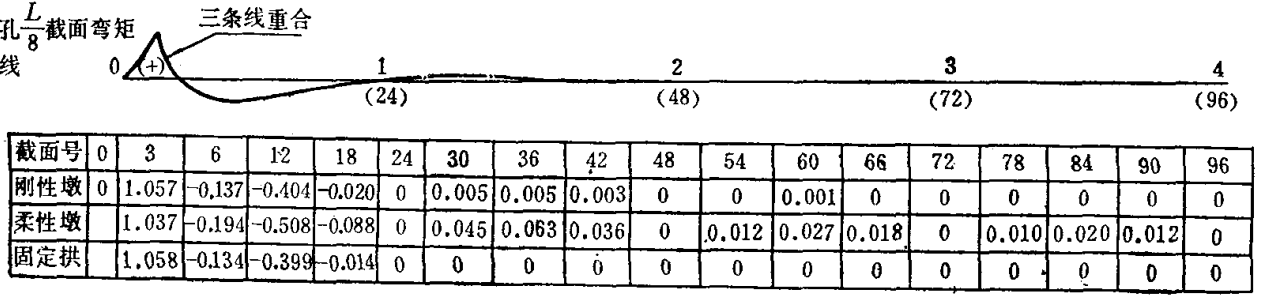
f) 第1孔水平力H影响线



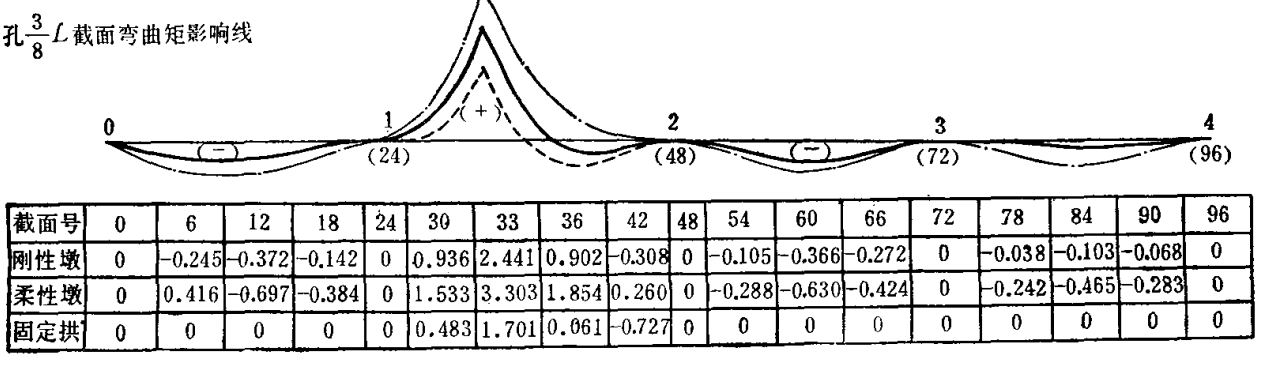
g) 第2孔水平力H2影响线



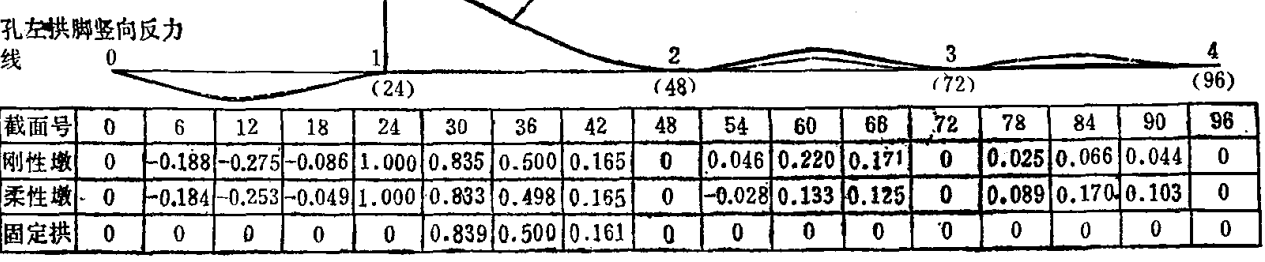
h) 第1孔L/8截面弯矩影响线



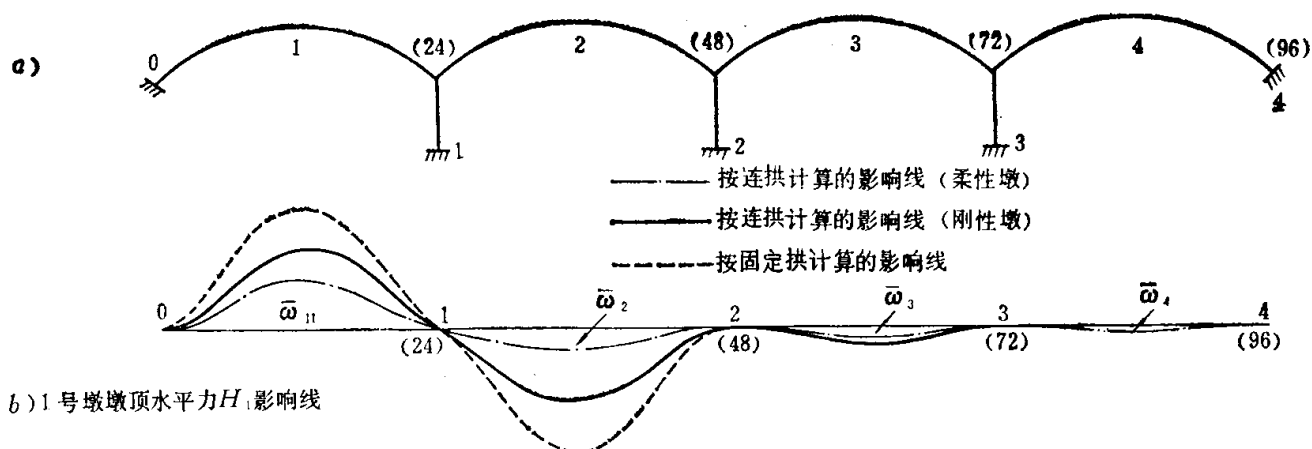
i) 第2孔3/8L截面弯矩影响线



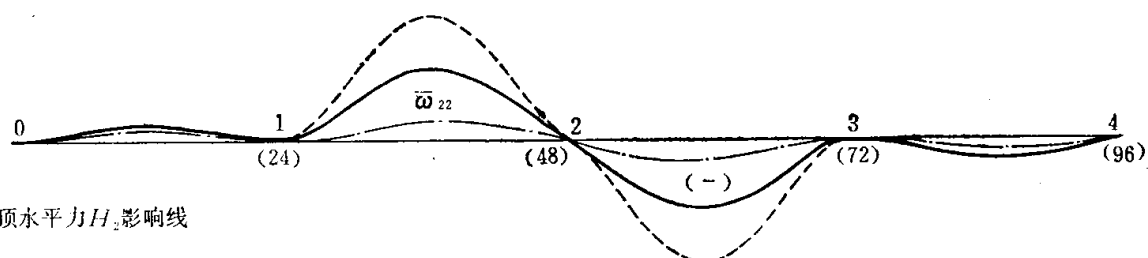
j) 第2孔左拱脚竖向反力影响线



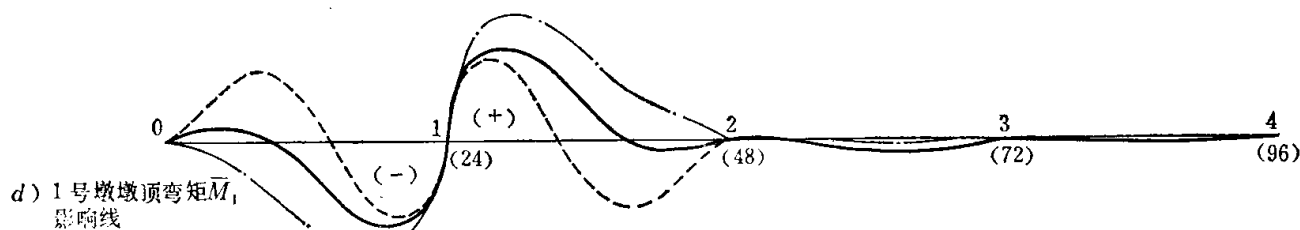
力影响线



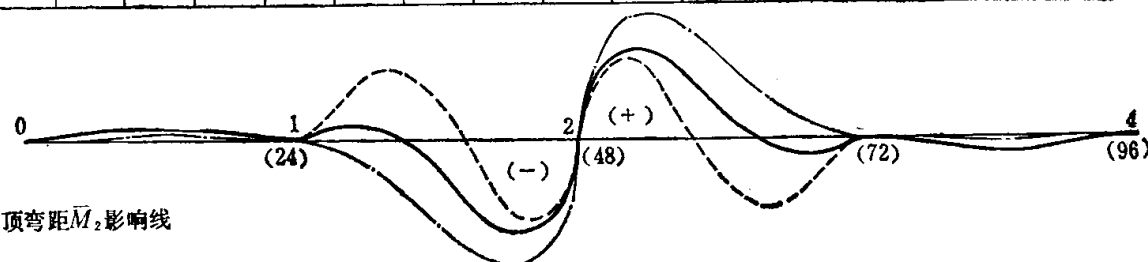
截面号	0	6	12	18	24	30	36	42	48	54	60	66	72	78	84	90	96
刚性墩	0	0.512	0.938	0.648	0	-0.546	-0.783	-0.455	0	-0.034	-1.21	-0.090	0	-0.013	-0.034	-0.023	0
柔性墩	0	0.182	0.355	0.278	0	-0.200	-0.227	-0.117	0	-0.032	-0.073	-0.050	0	-0.029	-0.055	-0.033	0
固定拱	0	0.820	1.403	0.820	0	-0.820	-1.403	-0.820	0	0	0	0	0	0	0	0	0



刚性墩	0	0.103	0.155	0.057	0	0.477	0.817	0.558	0	-0.558	-0.817	-0.477	0	-0.057	-0.155	-0.103	0
柔性墩	0	0.078	0.128	0.065	0	0.150	0.282	0.228	0	-0.228	-0.282	-0.150	0	-0.065	-0.128	-0.078	0
固定拱	0	0	0	0	0	0.820	1.403	0.820	0	-0.820	-1.403	-0.820	0	0	0	0	0



刚性墩	0	0.327	-0.438	-1.859	0	2.023	0.688	-0.231	0	-0.061	-0.196	-0.144	0	-0.020	-0.054	-0.036	0
柔性墩	0	-0.481	-1.846	-2.272	0	2.779	1.955	0.560	0	-0.058	-0.040	-0.040	0	-0.018	-0.035	-0.021	0
固定拱	0	1.339	1.078	-1.322	0	1.322	-1.078	-1.339	0	0	0	0	0	0	0	0	0



刚性墩	0	0.164	0.250	0.097	0	0.267	-0.633	-2.003	0	2.003	0.633	-0.267	0	-0.097	-0.250	-0.164	0
柔性墩	0	0.058	0.108	0.079	0	-0.539	-1.920	-2.761	0	2.761	1.920	0.539	0	-0.079	-0.108	-0.058	0
固定拱	0	0	0	0	0	1.339	1.078	-1.322	0	1.322	-1.078	-1.339	0	0	0	0	0

图1-5 墩顶内力影响线

(二)由于墩顶内力影响线正、负面积恒相等,故在图1-5b)中,有:

$$\bar{\omega}_{11} = -(\bar{\omega}_2 + \bar{\omega}_3 + \bar{\omega}_4) \quad (1-4)$$

式中: $\bar{\omega}_{11}$ 、 $\bar{\omega}_2$ 、 $\bar{\omega}_3$ 、 $\bar{\omega}_4$ ——按连拱计算时,墩顶水平力 $\bar{H}_1$ 的影响线在第1~4孔的面积。

由式(1-4)显而易见,在第1孔作用均布荷载 q 时,在1号墩墩顶产生的水平力,与在第2、3、4孔同时作用均布荷载 q 时,在第1号墩墩顶产生的水平力,大小相等、方向相反、具有相同的绝对值。由于一行汽车车队中仅有一辆重车,在多孔布载时,除1孔布置重车外,其余各孔只能布置主车。根据这个情况,在第2、3、4孔同时布载时,在1号墩墩顶产生的水平力,小于在第1孔布载时,在1号墩墩顶产生的水平力。由此可以得出结论:计算1号墩的最大水平力时,以荷载作用在第1孔时为不利。这一结论,除适用于汽车荷载外,对于履带荷载和挂车荷载,显然也是适用的。

(三)由图1-5c)可见,计算2号墩墩顶的 $\bar{H}_{max}$ 时,最不利布载情况有两种可能性:

- 1、2号墩以左各孔按 $\bar{H}_{max}$ 布载(重车布置在第2孔)、2号墩以右无载;
- 2、2号墩以右各孔按 $\bar{H}_{max}$ 布载(重车布置在第3孔)、2号墩以左无载。

在图1-5b)、c)中,因为 $\bar{\omega}_{11} > \bar{\omega}_{22}$,故在第1孔作用均布荷载时,在1号墩产生的水平力,大于在第2孔作用同样荷载时,2号墩产生的水平力。设计实践证明,在等跨等墩的多孔连拱中,边墩(在边孔按 $\bar{H}_{max}$ 布载)常比中墩(墩左或墩右按 $\bar{H}_{max}$ 布载)产生更大的水平力。计算桥墩的 $\bar{H}_{max}$ 时,常以边墩不利。

(四)由图1-5d)、e)可见,墩顶弯矩影响线的面积,按连拱计算比按固定拱计算的大。因而,按连拱计算的墩顶弯矩大于按固定拱计算的墩顶弯矩值。实践证明,采用柔性墩时,墩顶截面常由弯矩控制设计。在这种情况下,需按 $\bar{M}_{max}$ 或 $\bar{M}_{min}$ 布载,计算墩顶绝对值最大的弯矩值。

由图1-5d)可见,计算1号墩的墩顶最大弯矩(指绝对值,以下同)时,以荷载作用在1、3、4孔(或第2孔)为不利。由图1-5e)可见,计算2号墩墩顶最大弯矩时,以荷载作用1、3或2、4两孔为不利。考虑到远离计算墩时,墩顶内力影响线在该处的竖标较小,荷载作用在其上时,对墩顶内力的影响不大,为了简化计算,在计算等跨连拱的墩顶最大弯矩时,可以近似地采用下述办法、按1孔布载来考虑:

- 1.计算1号墩(边墩)墩顶最大弯矩时,采用荷载布置在第1孔(边孔)的图式。
- 2.计算2号墩的墩顶最大弯矩时,将荷载布置在第2孔(或第3孔)。一般地,计算第 i 号墩的墩顶最大弯矩时,采用荷载作用在第 i 孔(或第 $i+1$ 孔)的计算图式。

比较1、2号墩墩顶弯矩影响线的竖标知:1号墩墩顶弯矩影响线竖标较大〔见图1-5d)的第2孔部分〕,因而,计算墩顶最大弯矩时,仍以1号墩(边墩)控制设计。

第二章 连拱等代荷载的编制方法

编制连拱等代荷载时，采用了适应性较强、计算精度较高的换算刚度法。据此编制的连拱等代荷载，表格数量较少但应用范围较广，在精度方面，可以满足生产的要求。

第一节 换算刚度法的基本概念

图 2-1a) 为任意多孔连拱，假定荷载作用在第 r 孔。荷载孔以左有 a 孔（拱、墩编号自左起算），荷载孔以右有 b 孔（拱、墩编号自右起算）。换算刚度法是将荷载孔以左的所有拱墩结构以换算墩 A 代替，而将荷载孔以右的所有拱墩结构以换算墩 B 代替〔图 2-1b)〕，使第 r 孔作用任何荷载时，基本结构〔图 2-1b)〕中的结点 A 、 B 与原结构的结点 a 、 b 具有相同的变位。则求解图 2-1a 所示多孔连拱的高次超静定问题，就变成求解图 2-1b) 所示单跨拱的问题了。

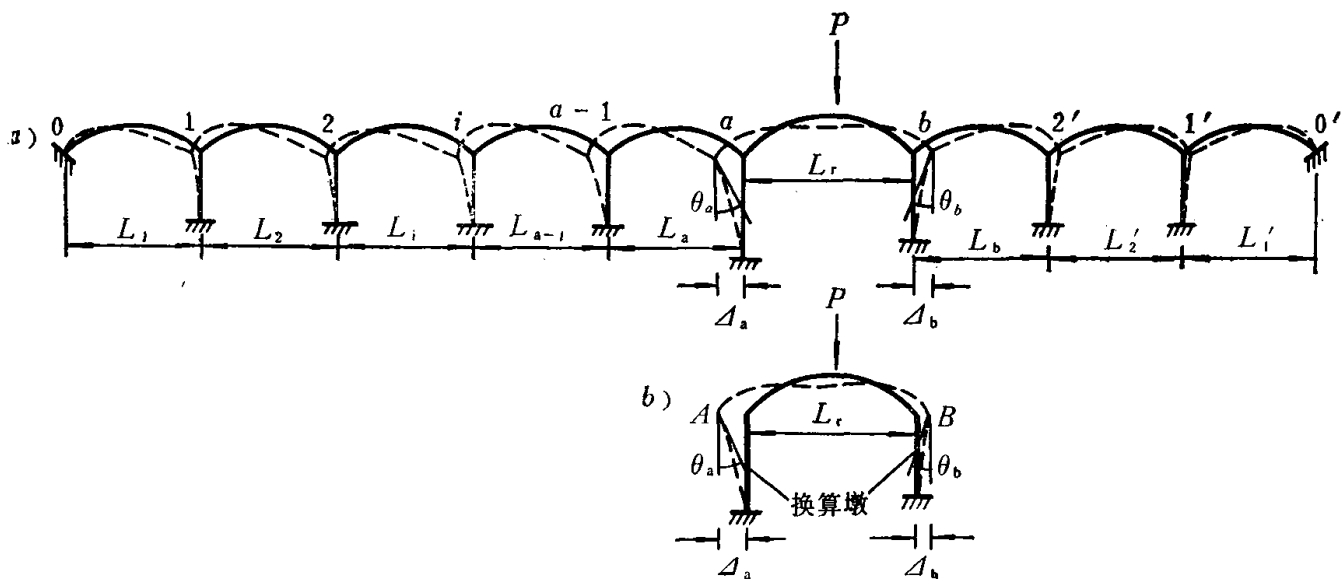


图 2-1 换算刚度法的基本结构

设换算墩 $A(B)$ 的弹性常数如下：

$K_A(K_B)$ ——换算墩 $A(B)$ 的换算抗推刚度；

$T_A(T_B)$ ——换算墩 $A(B)$ 的换算相干系数；

$S_A(S_B)$ ——换算墩 $A(B)$ 的换算抗弯刚度。

K_A 、 T_A 、 S_A (K_B 、 T_B 、 S_B) 总称换算墩 $A(B)$ 的换算刚度。在需要指明换算墩 $A(B)$ 所代表拱墩结构的具体孔数 i ($i=1, 2, \dots, n$) 时，换算刚度则以 $K_{A,i}$ 、 $T_{A,i}$ 、 $S_{A,i}$ ($K_{B,i}$ 、 $T_{B,i}$ 、 $S_{B,i}$) 表示；在不需要指明换算墩所代表拱墩结构的具体孔数 i 时，可以省掉换算刚度的第 2 个下角 i 。

为了保证基本结构〔图 2-1b)〕的结点 A 、 B 与原结构〔图 2-1a)〕的结点 a 、 b 具有相同的变位，换算墩 A 、 B 的换算刚度，应符合下列关系：

换算抗推刚度 $K_{A,a}(K_{B,b}) =$ 左边 a 孔结构 (右边 b 孔结构) 的抗推刚度;
 换算相干系数 $T_{A,a}(T_{B,b}) =$ 左边 a 孔结构 (右边 b 孔结构) 的相干系数;
 换算抗弯刚度 $S_{A,a}(S_{B,b}) =$ 左边 a 孔结构 (右边 b 孔结构) 的抗弯刚度。

第二节 换算刚度计算

为了导出无铰连拱换算刚度的计算公式, 先研究图2-2、2-3所示的单跨拱。在两图中, a 号墩为普通墩, 其弹性常数以 $\bar{K}_a$ 、 $\bar{T}_a$ 、 $\bar{S}_a$ 表示; $a-1$ 号墩为换算墩, 它代表 $a-1$ 孔拱墩结构, 其换算刚度以 $K_{A,(a-1)}$ 、 $T_{A,(a-1)}$ 、 $S_{A,(a-1)}$ 表示。

一、换算抗推刚度和换算相干系数

图2-2a) 所示单跨拱, 它可代表 a 孔 ($a = 1, 2, \dots$) 拱墩结构。当结点 a 仅产生单位水平位移 ($\Delta_a = 1$) 而无转动 ($\theta_a = 0$) 时, 结点 a 所需要的水平力, 称为该结构的换算抗推刚度 $K_{A,a}$; a 点所需要的弯矩, 称为该结构的换算相干系数 $T_{A,a}$ 。

图 2-2a) 所示单跨拱, 在 $K_{A,a}$ 与 $T_{A,a}$ 共同作用下, 与结点 a 产生单位水平位移的同时, 结点 $a-1$ 产生水平位移 Δ_{a-1} 和转角 θ_{a-1} 。当结点 $a-1$ 仅产生转角 θ_{a-1} 而 $\theta_a = 0$ 时, 两结点的结点力如图 2-2b) 所示; 当两结点仅产生水平位移 Δ_{a-1} 、 $\Delta_a = 1$ 时, 两结点的结点力如图2-2c) 所示。根据迭加原理, 图2-2a) 中的结点 $a-1$ 、 a 既有转角又有水平位移时, 两结点的结点力为图2-2b)、2-2c) 的结点力相加。由两结点水平力及弯矩的平衡条件, 可建立如下变位方程:

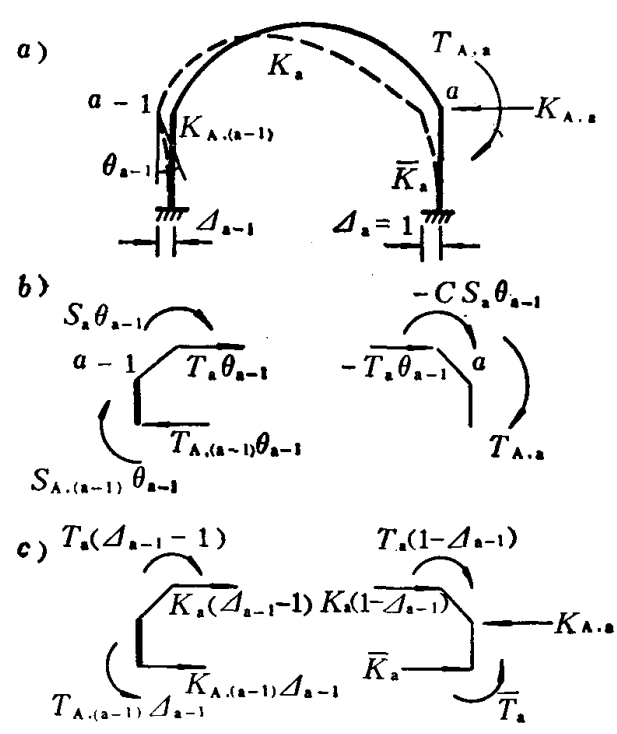


图2-2 换算抗推刚度和换算相干系数计算图式

$$\left. \begin{aligned}
 (K_{A,(a-1)} + K_a) \Delta_{a-1} - K_a + (T_a - T_{A,(a-1)}) \theta_{a-1} &= 0 & (a) \\
 (T_a - T_{A,(a-1)}) \Delta_{a-1} - T_a + (S_a + S_{A,(a-1)}) \theta_{a-1} &= 0 & (b) \\
 -K_a \Delta_{a-1} + K_a + \bar{K}_a - T_a \theta_{a-1} - K_{A,a} &= 0 & (c) \\
 -T_a \Delta_{a-1} + T_a - \bar{T}_a - C S_a \theta_{a-1} + T_{A,a} &= 0 & (d)
 \end{aligned} \right\} \quad (2-1)$$

式中: K_a 、 T_a 、 S_a 、 $C S_a$ ——第 a 孔拱的抗推刚度、相干系数、抗弯刚度、传递抗弯刚度;
 $K_{A,(a-1)}$ 、 $T_{A,(a-1)}$ 、 $S_{A,(a-1)}$ —— $a-1$ 号墩 (换算墩) 的换算抗推刚度、换算相干系数、换算抗弯刚度。

令

$$\left. \begin{aligned}
 \Sigma K_{A,(a-1)} &= K_{A,(a-1)} + K_a \\
 \Sigma T_{A,(a-1)} &= T_a - T_{A,(a-1)} \\
 \Sigma S_{A,(a-1)} &= S_{A,(a-1)} + S_a
 \end{aligned} \right\} \quad (2-2)$$

由式(2-1)中(a)、(b)得: