

弯、坡、斜石拱桥 设计算例

四川省交通厅勘察设计院 徐家兴 编
陈万荃

人民交通出版社

1923

弯、坡、斜石拱桥设计算例

四川省交通厅勘察设计院 徐家兴 编
陈万荃

人 民 交 通 出 版 社

内 容 提 要

本书根据1975年中华人民共和国交通部标准《公路桥涵设计规范(试行)》及《弯坡斜石拱桥标准图》编写而成。本书主要内容包
括:弯坡斜石砌等截面圆弧拱桥拱圈部分的设计资料、计算公式和设
计算例。在附录中并列有内力影响线电算成果。

本书可供公路桥梁设计、施工技术人员及有关院校师生参考使用。

弯、坡、斜石拱桥设计算例

四川省交通厅勘察设计院 徐家兴 编
陈万荃

人民交通出版社出版

(北京市安定门外和平里)

北京市书刊出版业营业许可证出字第006号

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: 6.375 字数: 141千

1981年3月 第1版

1981年3月 第1版 第1次印刷

印数: 0001—6,800册 定价: 1.00元

前 言

在修建公路时，一些桥梁由于受到地形的限制，桥位必须处于路线的平曲线上、纵坡道上或路线与河流、河谷斜交的路线上。因此，就要修建弯桥、坡桥或斜桥。

以前由于技术水平的限制，在修建弯、坡、斜拱桥时，一般就采用弯桥正作、斜桥正作和坡桥平作的办法，或者采取路线迁就桥位，降低路线技术标准方案。解放后，随着公路事业的不断发展，技术水平也随着不断地提高，逐渐地修建了一些能很好与公路路线配合的弯、坡、斜拱桥。

随着社会主义交通建设事业的发展，必将修建更多高标准的公路，这就需要修建更多的能使桥位与路线很好配合的弯、坡、斜拱桥。为了适应公路桥梁技术人员设计计算弯、坡、斜拱桥的需要，我们特按照原交通部公路设计院1964年编《拱桥设计计算手册（第二版）》（以下简称‘手册’）的设计计算方法，编写了这本《石砌弯、坡、斜拱桥设计计算例》（仅计算拱圈部分）。我们认为所采用的弯、坡、斜拱的计算理论和方法还存在着一些问题，有待在今后的实践中不断地进行验证、修改和提高。

设计计算例遵照1975年交通部部标准《公路桥涵设计规范（试行）》（以下简称“桥规”）有关规定进行计算。

1. 拱圈内力按弹性理论计算，当拱圈跨径小于或等于20米，矢跨比大于或等于 $1/4$ ，以及拱圈跨径小于或等于10米，矢跨比大于或等于 $1/5$ 时不计弹性压缩。

2. 对于跨径不大于25米的砖、石、混凝土预制块砌体的

拱圈，当矢跨比等于或大于 $1/5$ 时，不计温度影响力。

3. 填料厚度（包括路面厚度）等于或大于50厘米的拱桥，不计汽车荷载的冲击力。

4. 活载横向分布按整体平均分布计算。

5. 偏心受压构件，当截面弯曲拉应力超过容许值，但计算偏心距不超过有关规定时，不考虑受拉区工作，按开裂计算公式重新验算压应力。

由于水平有限，缺点和错误在所难免，欢迎读者批评指正。

本书在编写过程中得到我院有关领导的大力支持和李震威工程师的具体帮助，在此表示谢意。

四川省交通厅勘察设计院

徐家兴、陈万荃

目 录

第一章 弯石拱桥	1
第一节 概述	1
第二节 设计时的基本假定	3
第三节 内力计算	4
一、垂直力作用下的内力计算	4
二、水平力作用下的内力计算	5
第四节 拱圈截面综合应力验算	10
第五节 其他	11
第六节 设计算例	12
一、设计资料及基本数据	12
二、内力计算	12
第二章 坡石拱桥	37
第一节 概述	37
第二节 设计原理	38
第三节 正拱斜置对称拱的内力计算	39
一、恒载水平力作用下拱的内力计算	39
二、活载水平力作用下拱的内力计算	43
第四节 三角斜填土坡拱的内力计算	48
一、弹性中心内力计算	48
二、拱脚截面内力计算	50
第五节 设计算例（正拱斜置坡拱桥）	52
一、设计资料及基本数据	52
二、恒载内力计算	54

三、	活载内力计算	55
四、	应力验算	57
五、	小结	62
第三章	斜石拱桥	64
第一节	概述	64
第二节	设计原理及计算公式	66
第三节	内力计算	73
一、	常变位计算	73
二、	载变位计算	78
三、	拱圈截面内力计算	81
第四节	拱圈截面应力验算	82
一、	落空剪应力 τ 的验算 (错缝剪应力)	82
二、	在截面 $n-n$ 边缘处因 Q_z 产生的剪应力的 验算	84
三、	正应力验算	85
第五节	其他	86
第六节	设计算例	87
一、	设计资料及基本数据	87
二、	内力影响线纵坐标计算	93
三、	恒载内力计算	97
四、	活载内力计算	97
五、	应力组合	105
六、	应力验算	105
附录 (附表1-1~附表3-5)		111
附表1-1	弯拱桥垂桥向水平力弹性中心及拱脚截面内 力影响线纵坐标表	112
附表2-1	坡拱桥顺桥向水平力弹性中心内力影响线纵 坐标表	152

附表2-2 坡拱桥顺桥向水平力拱脚截面内力影响线纵坐标表.....	156
附表3-1 整体式斜石拱桥拱脚截面 M_z 影响线纵坐标表.....	164
附表3-2 整体式斜石拱桥拱脚截面 M_y 影响线纵坐标表.....	176
附表3-3 整体式斜石拱桥拱脚截面 M_x 影响线纵坐标表.....	176
附表3-4 整体式斜石拱桥拱脚截面 N 影响线纵坐标表.....	182
附表3-5 整体式斜石拱桥拱脚截面 Q 影响线纵坐标表.....	188
参考资料.....	195

第一章 弯石拱桥

第一节 概 述

在山区公路中路线弯道较多，且曲线半径也较小，在弯道跨越河流或狭谷时，常常需要设置弯石拱桥。

弯石拱桥除了本身具有和路线同样的弯道外，桥面的行车道也必须和路线一样按1972年交通部标准《公路工程技术标准(试行)》中(以下简称“标准”)的规定进行加宽和设置单向横坡(超高)。

弯道加宽，“标准”中规定：平曲线半径等于或小于200米时，应在平曲线内侧加宽。双车道路面的加宽值规定如表1-1，单车道路面加宽值按表列数值折半。

表1-1

半 径 R (米)	200	150	100	70	50	30	25	20	15
加 宽 (米)	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.8	2.2	2.5

弯道超高，《标准》中规定：当平曲线半径小于表1-2规定的不设超高的半径时，应在曲线上设置超高。超高的横坡度应按计算行车速度、半径大小、路面种类、自然条件等情况，在2~6%范围内设置。当超高横坡度小于路拱坡度时，设置等于路拱坡度的超高。

弯拱桥的平面布设情况有两种不同方案。

(一)桥墩两侧边线与桥面弯道轴线正交，即两侧边线均

表1-2

公 路 等 级	一	二		三		四	
		平原 微丘	山岭 重丘	平原 微丘	山岭 重丘	平原 微丘	山岭 重丘
不设超高的平 曲线半径(米)	2000	1000	250	500	150	250	100

在桥面弯道半径方向上，也即两侧拱脚线与弯道半径方向重合，由于拱脚线不平行，拱圈为锥面拱形式（图1-1a）。

（二）同跨内拱脚线通过拱跨中心的桥面弯道半径方向平行，即两桥墩相邻边线平行，各与弯道半径方向略成角度。由于拱脚线平行，拱圈为圆面拱形式（图1-1b）。

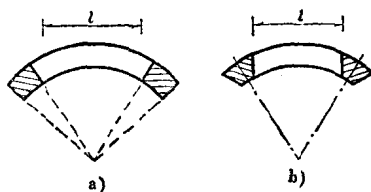


图 1-1

两者比较，前者桥墩体积较小，但施工较复杂，后者桥墩体积较大，但施工较容易，且比较接近于一般正桥的平面几何形状。本设计实例采用后者。这样可以避免拱圈砌筑过分复杂与困难，也简化了拱架的制作安装，与一般拱桥无大差异。主要缺点是当平曲线半径较小而跨径又较大时，扇形桥墩的大头与小头的宽度相差较大，对基底土壤承压应力的要求亦相差悬殊。同时桥墩与水流方向又不一致，使桥下水流极为不利。因此在小半径平曲线上应尽量避免修建跨径较大的多孔弯拱桥。

弯石拱桥拱圈的砌筑方法可采用一般拱桥的砌筑方法和程序，但对于拱圈外侧的突出部分应选用较长的石料，并特别注意错缝。最好能每隔一行使其伸入拱圈中间直线部分约20~30厘米。并将外侧突出部分的砌筑砂浆的标号予以提

高。另外在拱脚处应采用与平面弯曲轴线正交的五角石。

第二节 设计时的基本假定

弯拱桥的拱圈内力计算如根据其立体几何图形按精确的理论分析,其计算过程将相当复杂,现在一般均按下述简化方法计算。

弯拱桥在结构计算时除了考虑一般拱桥的变形因素外还要考虑:

(一)引起拱立体挠曲(即垂直于拱立面的挠曲)的下列因素:

- 1.垂直于桥梁立面的风压力。
- 2.垂直于桥梁立面的地震波引起的地震力。
- 3.汽车在弯道上行驶时所发生的离心力。

(二)在桥梁平面位置上,由于垂直荷载位置对桥纵轴不对称而引起的桥跨结构的扭曲,如超高引起的恒载偏心,活载位置不对称所引起的偏心等。

但在具体设计计算中,为了简化计算,作了如下的基本假定:

1.在引起拱立体挠曲因素中,不考虑垂直桥向的风压力及地震力仅考虑车辆的离心力,离心力按《桥规》下述规定进行计算:

弯道桥的曲线半径等于或小于250米时,应计算离心力。离心力等于车辆荷载(不计冲击力)乘以离心力系数 C 。

$$\text{离心力系数: } C = \frac{V^2}{127 R}$$

$$\text{离心力: } F = C \cdot G \quad (1-1)$$

式中: V ——计算行车速度,按所在路线等级的规定采用

(公里/时)；

R ——弯道半径 (米)；

G ——轮重 (吨)。

计算多车道桥的离心力时应按规定将车辆荷载予以折减。离心力的着力点在桥面上。

不同的路线等级要求不同的设计行车速度和最小半径，但 $\frac{V^2}{R}$ 值变化不大。算例中为了简化计算，近似的采用平均值 (按 $R = 50$ 米， $V = 40$ 公里/时计算)：

$$F = 0.25G$$

2. 在各种半径上，超高均采用 3%，恒载按拱全宽均布计算，不考虑超高恒载偏心对纵轴引起的扭矩，弯道则按规定予以加宽。

3. 计算竖向荷载时不考虑其偏心对纵轴的扭转影响。

4. 不考虑桥宽两侧的曲线形部分，取中间直线矩形部分作为计算结构 (图 1-2)，按正拱计算，而把两侧曲线形部分的重量作为荷载，近似地验算其对纵轴的扭转作用。

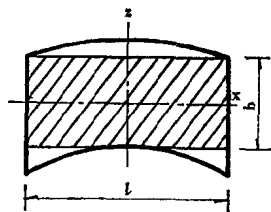


图 1-2

第三节 内力计算

一、垂直力作用下的内力计算

根据以上假定，拱在垂直力作用下，结构在竖平面内的垂直力作用下，不产生立体挠曲 (即垂直竖平面的挠曲)。故拱在垂直力作用下的内力计算与一般正拱相同，不再赘述。

二、水平力作用下的内力计算

由于车辆荷载使弯拱桥承受垂直于桥梁方向、作用点在路面上的水平离心力。

在水平外力作用下，拱顶切割处作用有如图 1-3 所示的赘余未知力。即：水平剪力 x_4 ，垂直于立面的平面弯矩 x_5 ，对拱轴的扭矩 x_6 ；（图 1-3 所示的 x_4 ， x_5 ， x_6 的方向假定为正值），外力假定作用于右半拱，且迎面而来，将外力分解为一组正对称力及一组反对称力。

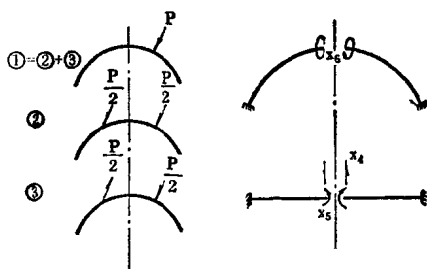


图 1-3

(一) 正对称外力作用下的内力计算

$$x_4 = x_6 = 0$$

$$x_5 = -\frac{\Delta_{5P}}{\delta_{55}} \quad (1-2)$$

$$\text{常变位 } \delta_{55} = \int_s \frac{M_5^2}{EI} ds + \int_s M_{5T} \theta_5 ds \quad (1-3)$$

$$\text{载变位 } \Delta_{5P} = \int_s \frac{M_5 M}{EI} ds + \int_s M_T \theta_5 ds \quad (1-4)$$

式中： I —— 拱截面横向惯矩；

M 及 M_T —— 在基本体系的截面中由于一组外力 $\frac{P}{2}$

作用引起的弯矩与扭矩；

M_s 及 M_{sT} ——在基本体系的截面中由于单位力矩的作用引起的弯矩与扭矩;

θ_s ——拱的两个距离为 1 的截面之间, 由于单位扭矩产生的扭角。

$$\theta_s = \frac{M_{sT}}{GJ_d} - \frac{M_{sT}}{G\beta bd^3} \quad (1-5)$$

其中: G ——剪切弹性模量;

J_d ——极转动惯矩 ($J_d = \beta bd^3$)。

又如图 1-4 所示:

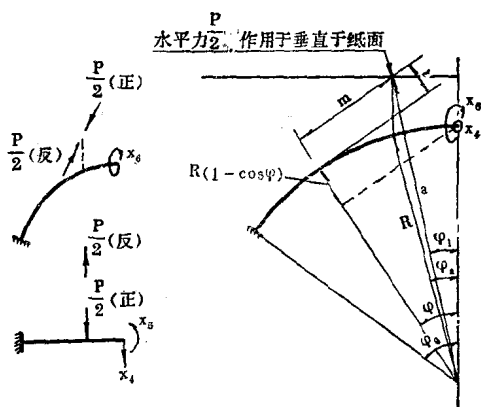


图 1-4

$$M = -\frac{1}{2} Pm$$

$$M_T = \mp \frac{1}{2} Pt$$

$$M_s = \cos \varphi$$

$$M_{sT} = \mp \sin \varphi$$

上边符号适用于左半拱, 下边符号适用于右半拱。

式中: P ——外力;

m 及 t ——计算截面处拱轴法线及切线至外力作用点的距离;

$$i = a \cos (\varphi - \varphi_1) - R; \quad m = a \sin (\varphi - \varphi_1)。$$

代入公式 (1-3) 及 (1-4)，并略去式中第一项，即不考虑弯曲对变形的影响，可得：

$$\delta_{55} = \int_s M_{5T} \theta_5 ds = \frac{R}{G\beta b d^3} (\varphi_0 - \sin \varphi_0 \cos \varphi_0) \quad (1-6)$$

式中： β ——系数，由于 $\frac{d}{b}$ 一般小于 $\frac{1}{10}$ ，可取 $\beta = 0.333$

b, d ——拱圈截面的宽度及厚度。

$$\begin{aligned} \Delta_{5P} = \int_s M_T \theta_5 ds = \frac{PR}{GJ_d} & \left\{ \frac{1}{2} a \cos \varphi_1 (\sin^2 \varphi_0 - \sin^2 \varphi_a) \right. \\ & + a \sin \varphi_1 \left[\frac{1}{2} (\varphi_0 - \sin \varphi_0 \cos \varphi_0) - \frac{1}{2} (\varphi_a - \sin \varphi_a \right. \\ & \left. \left. \cos \varphi_a) \right] + R (\cos \varphi_0 - \cos \varphi_a) \right\} \quad (1-7) \end{aligned}$$

注：不考虑 δ_{55} 、 Δ_{5P} 的第一项，其对 x_a 的最大误差约为 $\pm 10\%$ ，对于最后的截面应力计算结果，其误差在 $\pm 5\%$ 左右。

(二) 反对称外力作用下的内力计算

$$x_5 = 0$$

$$\left. \begin{aligned} \delta_{44} x_4 + \delta_{46} x_6 + \Delta_{4P} &= 0 \\ \delta_{64} x_4 + \delta_{66} x_6 + \Delta_{6P} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1-8)$$

$$\text{设：} \beta_1 = \frac{\delta_{64}}{\delta_{44}} \quad \beta_2 = \frac{\delta_{46}}{\delta_{66}}$$

$$\text{则：} \quad x_4 = - \frac{\Delta_{4P} - \beta_2 \Delta_{6P}}{\delta_{44} - \beta_2 \delta_{64}} \quad (1-9)$$

$$x_6 = - \frac{\Delta_{6P} - \beta_1 \Delta_{4P}}{\delta_{66} - \beta_1 \delta_{44}} \quad (1-10)$$

以上两公式系按 P 作用在右半拱时推导出来的，如 P 作用在左半拱时， x_4 、 x_6 的方向与假定的相反。

$$\text{常变位: } \delta_{44} = \int_s M_{4T} \theta_4 ds \quad (1-11)$$

$$M_{4T} = R(1 - \cos\varphi)$$

$$\theta_4 = \frac{M_{4T}}{GJ_d} = \frac{R(1 - \cos\varphi)}{GJ_d}$$

$$\begin{aligned} \delta_{44} &= \int_0^{\varphi_0} \frac{2R^3(1 - \cos\varphi)^2}{GJ_d} d\varphi \\ &= \frac{1}{GJ_d} 2R^3 \left[\varphi_0 - 2\sin\varphi_0 \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{2}(\varphi_0 + \sin\varphi_0 \cos\varphi_0) \right] \quad (1-12) \end{aligned}$$

$$\delta_{46} = \int_s M_{4T} \theta_6 ds$$

$$M_{4T} = R(1 - \cos\varphi)$$

$$\begin{aligned} \delta_{46} &= \int_0^{\varphi_0} \frac{2R^2(1 - \cos\varphi)\cos\varphi}{GJ_d} d\varphi \\ &= \frac{1}{GJ_d} 2R^2 \left[\sin\varphi_0 - \frac{1}{2}(\varphi_0 + \cos\varphi_0 \sin\varphi_0) \right] \quad (1-13) \end{aligned}$$

$$\delta_{46} = \delta_{64}$$

$$\delta_{66} = \int_s M_{6T} \theta_6 ds$$

$$M_{6T} = \cos\varphi \quad ; \quad \theta_6 = \frac{M_{6T}}{GJ_d} = \frac{\cos\varphi}{GJ_d}$$

$$\begin{aligned} \delta_{66} &= \int_0^{\varphi_0} \frac{2R}{GJ_d} \cos^2\varphi d\varphi = \frac{R}{GJ_d} (\varphi_0 + \cos\varphi_0 \sin\varphi_0) \\ &\quad (1-14) \end{aligned}$$

载变位:

$$M_T = \frac{1}{2}Pt = \frac{1}{2}P[a\cos(\varphi - \varphi_1) - R]$$

$$\theta_4 = \frac{R(1 - \cos\varphi)}{GJ_d}$$

$$\begin{aligned}\Delta_{4P} &= \int_s M_T \theta_4 ds = \int_{\varphi_1}^{\varphi_0} \frac{PR^2}{GJ_d} [a\cos(\varphi - \varphi_1) - R] \\ &\quad (1 - \cos\varphi) d\varphi \\ &= \frac{R^2}{GJ_d} \left\{ a\cos\varphi_1 (\sin\varphi_0 - \sin\varphi_1) - a\sin\varphi_1 (\cos\varphi_0 \right. \\ &\quad \left. - \cos\varphi_1) - R(\varphi_0 - \varphi_1) - a\cos\varphi_1 \left[\frac{1}{2}(\varphi_0 \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + \cos\varphi_0 \sin\varphi_0) - \frac{1}{2}(\varphi_1 + \cos\varphi_1 \sin\varphi_1) \right] \right. \\ &\quad \left. - \frac{1}{2}a\sin\varphi_1 (\sin^2\varphi_0 - \sin^2\varphi_1) + R(\sin\varphi_0 \right. \\ &\quad \left. - \sin\varphi_1) \right\} \quad (1-15)\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\Delta_{6P} &= \int_s M_T \theta_6 ds = \int_{\varphi_1}^{\varphi_0} \frac{PR[a\cos(\varphi - \varphi_1) - R]\cos\varphi}{GJ_d} d\varphi \\ &= \frac{R}{GJ_d} \left[a\cos\varphi_1 \frac{1}{2}(\varphi_0 + \cos\varphi_0 \sin\varphi_0 - \varphi_1 - \cos\varphi_1 \right. \\ &\quad \left. \sin\varphi_1) + \frac{1}{2}a\sin\varphi_1 (\sin^2\varphi_0 - \sin^2\varphi_1) \right. \\ &\quad \left. - R(\sin\varphi_0 - \sin\varphi_1) \right] \quad (1-16)\end{aligned}$$

(三)拱圈截面内力计算

在垂直力作用下,按一般正拱桥计算。