

# 双曲拱桥横向分布系数计算方法研究

许准

(湖南致力工程科技有限公司, 湖南 长沙 410006)

**摘要:** 随着交通量的增加, 现役双曲拱桥普遍损坏较严重, 有必要通过荷载试验对其承载能力进行评定。文中基于一座双曲拱桥的荷载试验数据, 分别采用刚性横梁法、刚接梁法、弹性支承连续梁法、梁格法进行计算, 分析其横向分布系数的真实状况, 评估其安全性能。

**关键词:** 桥梁; 双曲拱桥; 荷载试验; 横向分布系数

中图分类号: U441

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2018)05-0109-03

双曲拱桥因其节省钢材、施工进度较快、造价便宜等优点在 20 世纪中国公路建设中得到普遍应用。随着公路交通量的增长, 现役双曲拱桥大部分存在严重病害, 其承载能力受到影响, 结构存在安全隐患。特别是横向联系梁及拱波普遍存在开裂现象, 对其横向分布影响的分析是一个值得研究的课题。该文对 4 种横向分布影响系数计算方法进行对比分析, 为该桥型承载能力评定提供理论依据。

## 1 工程概况

某 1×60 m 双曲拱桥, 宽度 10.5 m=净 7 m 行车道+2×1.75 m 人行道。主拱肋分为 6 片, 单肋 1.58 m, 高 1.24 m, 采用钢筋砼。上部结构拱轴线为悬链线, 净跨 60 m, 矢高 7.42 m, 矢跨比 1/8, 拱轴系数 3.5。腹拱为 4 m 跨径等截面圆弧拱, 材料为砼。采用重力式桥台、扩大基础。桥型布置及跨中横断面见图 1。

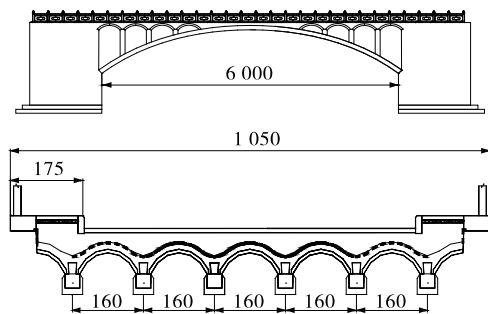


图 1 某双曲拱桥桥型布置及跨中横断面(单位:cm)

## 2 理论计算结果分析

### 2.1 刚性横梁法

刚性横梁法计算荷载横向分布系数  $m$  适用于

跨宽比大于 2 的情况, 中间横隔梁可近似看作 1 根刚度为无穷大的刚性梁, 横隔梁仅发生刚体位移, 且忽略梁肋的抗扭刚度。当偏心荷载  $P=1$  作用于各梁肋时, 各梁肋横向分布影响线竖距为:

$$\eta_{ik} = \frac{I_i}{\sum_{i=1}^n I_i} \pm \frac{a_i a_k I_i}{\sum_{i=1}^n a_i^2 I_i}$$

式中:  $\eta_{ik}$  为  $i, k$  号梁处横向分布影响线竖距;  $I_i$  为  $i$  号梁的惯性矩;  $a_i, a_k$  分别为  $i, k$  号梁离中性轴的距离。

根据桥梁最不利荷载组合的轮载位置, 计算所有轮载位置的影响线竖距, 从而求得各梁肋的横向分布影响系数。

该桥横向刚度较大, 且桥跨  $l$ /桥宽  $B=60/10.5=5.7>2$ (窄桥), 可采用刚性横梁法计算在偏载情况下各梁肋的横向分布影响系数。该桥各主梁的横截面相等, 梁数为 6 片, 梁间距为 1.6 m, 则:

$$\sum_{i=1}^6 a_i^2 = 2 \times (4^2 + 2.4^2 + 0.8^2) = 44.8 \text{ m}^2$$

1# 梁在 1# 和 6# 梁处的横向分布影响线竖距分别为:

$$\eta_{11} = \frac{1}{6} + \frac{4 \times 4}{44.8} = 0.524$$

$$\eta_{16} = \frac{1}{6} - \frac{4 \times 4}{44.8} = -0.19$$

绘出各梁肋横向分布的影响线, 按荷载试验跨中偏载工况进行最不利布置, 求得各梁肋在偏载工况下的横向影响系数。因篇幅关系, 其他梁肋的计算过程从略。刚性横梁法横向分布影响计算见图 2, 各梁肋在偏载工况下的横向分布影响系数见表 1 (为便于书写, 列出的为  $\eta$  值的 1 000 倍, 下同)。

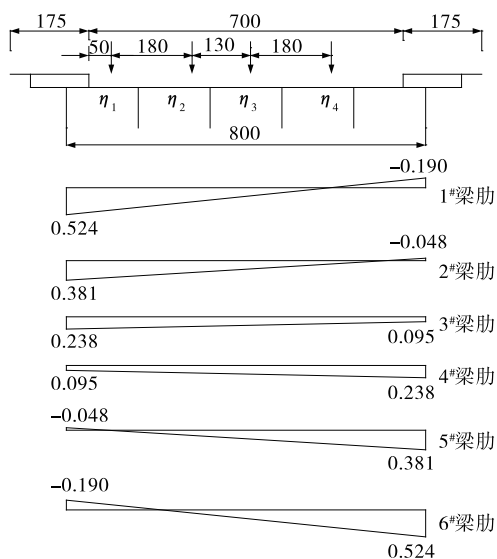


图2 刚性横梁法横向分布影响计算示意图(单位:cm)

表1 刚性横梁法计算所得各梁肋横向分布影响系数

梁肋号	$\eta_1$	$\eta_2$	$\eta_3$	$\eta_4$	$m_i$
1	434	274	158	-3	0.431
2	327	230	161	65	0.392
3	220	188	165	133	0.353
4	113	145	168	200	0.313
5	5.6	102	172	268	0.274
6	-100	60	176	336	0.236

## 2.2 刚接梁法

刚接梁法把桥跨结构在纵向沿主梁连接处切开,相邻梁肋之间视为刚接,可传递剪力与弯矩,切口处以赘余力取代,把整个结构看作由这些赘余力连接起来的超静定结构,然后用力法求解。

计算得该桥主梁梁肋抗弯惯性矩及抗扭惯性矩分别为  $I=0.1421 \text{ m}^4$ 、 $I_T=0.00595 \text{ m}^4$ ,内横梁抗弯惯性矩平均分布于横梁间距的等刚度桥面板抗弯惯性矩  $I_1=I_y/4=0.0138 \text{ m}^4/\text{m}$ 。把相关参数代入公式,得主参数  $\gamma$ 、 $\beta$  为:

$$\gamma = \frac{\pi^2 EI}{4GI_T} \left( \frac{b}{l} \right)^2 = 0.0985$$

$$\beta = \frac{\pi^4 Id^3}{3l^4 I_1} = 3.22 \times 10^{-6}$$

式中: $\gamma$  为主梁抗弯刚度与抗扭刚度比例参数; $E$  为弹性模量; $G$  为剪切模量; $b$  为主梁宽度; $\beta$  为主梁抗弯刚度与桥面板抗弯刚度比例参数; $d$  为主梁之间桥面板净跨径的一半。

因  $\beta$  值较小,近似取  $\beta=0$ ;取  $\gamma=0.1$ ;取《公路桥梁荷载横向分布计算》中各梁肋的影响线竖标  $\eta$

值。刚接梁法横向分布影响计算见图3,各梁肋在偏载工况下的横向分布影响系数见表2。

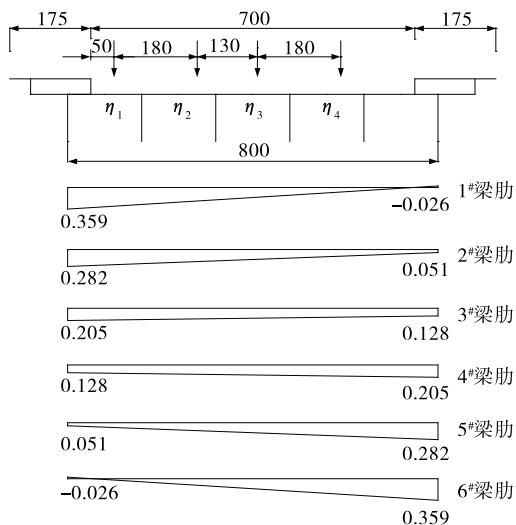


图3 刚接梁法横向分布影响计算示意图(单位:cm)

表2 刚接梁法计算所得各梁肋横向分布影响系数

梁肋号	$\eta_1$	$\eta_2$	$\eta_3$	$\eta_4$	$m_i$
1	311	224	162	75	0.386
2	253	201	164	112	0.365
3	195	178	165	148	0.343
4	138	155	167	185	0.323
5	79	131	169	221	0.300
6	22	108	171	257	0.279

## 2.3 弹性支承连续梁法

弹性支承连续梁法将双曲拱桥横桥向比拟为弹性支承的连续梁结构,梁肋处模拟为弹性支承约束,支承刚度取拱肋处的拱顶刚度,通过对横桥向施加  $P=1$  的单位集中力,求得各弹性支承处的反力。其计算需满足的基本假定为不计拱上建筑如立柱、侧墙、拱上填料对拱肋的影响,只把拱顶上的横隔板、拱波看作是弹性支承在各梁肋单元上。

计算得  $I=0.1421 \text{ m}^4$ 、 $I_1=0.0138 \text{ m}^4/\text{m}$ 。把相关参数代入公式,得主参数  $\alpha$ 、 $Z$  为:

$$\alpha = \frac{16b^3 I}{I_1 l^4} = \frac{16 \times 1.6^3 \times 0.1421}{0.0138 \times 60^4} = 5.2 \times 10^{-5}$$

$$Z = \frac{1}{\alpha} \approx 19204$$

因  $Z$  值较大,直接取  $Z=500$ ,结合反力互等及对称相等原理,求得各梁肋影响线。将偏载工况下的车轮位置按杠杆法求得各主梁位置的反力影响系数  $R_i$ ,则梁肋横向分布影响系数  $m_i = \sum R_k \eta_{ik}$ ,计算结果见表3。

表 3 弹性支承连续梁法计算所得各梁肋横向分布影响系数

梁肋号	各荷载位 $R_k$ 处的 $\eta_{ik}$						$m_i = \sum R_k \eta_{ik}$
	$R_1=0.187$	$R_2=0.437\ 5$	$R_3=0.593\ 75$	$R_4=0.437\ 5$	$R_5=0.343\ 75$	$R_6=0$	
1	0.538 16	0.379 14	0.230 95	0.088 99	-0.048 18	-0.183 06	0.426
2	0.379 14	0.296 55	0.210 82	0.124 02	0.037 67	-0.048 18	0.393
3	0.230 95	0.210 82	0.187 50	0.157 74	0.124 02	0.088 99	0.358
4	0.088 99	0.124 02	0.157 74	0.187 50	0.210 82	0.230 95	0.319
5	-0.048 18	0.037 67	0.124 02	0.210 82	0.296 55	0.379 14	0.275
6	-0.183 06	-0.048 18	0.088 99	0.230 95	0.379 14	0.538 16	0.229

2.4 梁格法

梁格法的主要思路是将上部结构用一等效的纵横梁组成的平面梁格来模拟,将分散在板式或箱梁每一区段内的弯曲刚度和抗扭刚度集中于最邻近的等效梁格内、实际结构的纵向刚度集中于纵向梁格构件内、横向刚度集中于横向梁格构件内,不计桥面板的横向联系作用。这样结构会形成一个  $n(m-2)$  的超静定结构( $n$  为横梁数; $m$  为梁肋数),计算过程非常繁琐,一般情况下需通过计算机进行辅助分析计算。

采用有限元软件对该桥进行离散分析,全桥分为 186 个节点、260 个单元,两端采用固结约束。计算得到各梁肋横向分布影响系数见表 4。

表 4 梁格法计算所得各梁肋横向分布影响系数

梁肋号	$m_i$	梁肋号	$m_i$
1	0.498	4	0.224
2	0.420	5	0.124
3	0.328	6	0.028

3 各方法计算结果与荷载试验结果对比

采用荷载试验跨中偏载数据,每片梁肋架设百分表并粘贴 2 片应变片进行检测。对实测数据进行转换,得到实测横向分布影响系数,其与上述理论计算结果的对比见图 4、表 5。

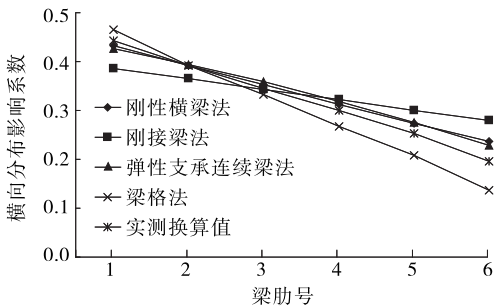


图 4 实测与理论计算横向分布影响系数对比

表 5 理论计算结果与实测换算值间的偏差

梁肋号	各方法计算结果与实测换算值间的偏差/%			
	刚性横梁法	刚接梁法	弹性支承连续梁法	梁格法
1	-2.5	-12.8	-3.8	5.0
2	-0.2	-6.9	0.2	0.1
3	2.1	-0.8	3.7	-3.6
4	4.6	7.8	6.7	-10.6
5	8.4	18.8	9.0	-17.6
6	20.4	42.3	16.8	-30.7

4 结论

(1) 刚接梁法计算的横向分布系数与实测值相差较大,其中 6# 梁肋处计算结果与实测换算值相差 42.3%。这是因为双曲拱桥梁肋截面的抗扭刚度比一般 T 梁大,导致  $\gamma$  值过小,使理论计算数据存在一定误差。虽然 T 梁横向分布系数计算中推荐采用刚接梁法,但不建议采用该方法计算双曲拱桥的横向分布系数。

(2) 双曲拱桥梁肋的横梁刚度较大,刚性横梁法与连续梁支承法的横向分布系数较相近,当横向联系刚度较弱时,两种方法才会有一定区别。在双曲拱桥横向分布系数计算中,两者均与实测值有较好的一致性,在偏载侧的 1#~5# 梁肋,两种方法计算值与实测换算值相差均在 10% 以内。但在非偏载侧,两种方法计算的横向分布系数偏大,如 6# 梁肋的刚性横梁法、连续梁支承法计算值与实测换算值分别相差 20.4%、16.8%。

(3) 梁格法的计算结果在偏载端与实测结果吻合较好。但随着与偏载端距离的增大,计算结果逐渐偏离实测换算值。梁格法不考虑桥面板的横向联系作用,故形成一定程度上的单板受力效应,使远离

形横撑的形式在全桥范围内等间距设置,分别在全桥均匀设置 3、5、7、9 和 11 对横撑,对应间距分别为 57、38、28.5、22.8 和 19 m,得到不同工况下全桥稳定系数(见表 3 和图 6)。

表 3 不同横撑间距下全桥稳定系数

横撑间距/m	稳定系数	横撑间距/m	稳定系数
57.0	3.471	22.8	7.788
38.0	5.542	19.0	7.788
28.5	6.903		

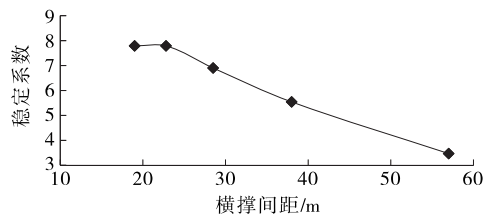


图 6 全桥稳定系数与横撑间距的关系

由图 6 可知:在全桥范围内等间距设置横撑,横撑设置较少、间距较大时,拱桥的稳定系数随着横撑间距的减小而显著增大;但横撑间距小于 22.8 m 时,减小横撑间距,全桥稳定系数不变。而且在横撑间距较大(大于 22.8 m)时,全桥第一阶失稳模态相同,均为拱肋面外对称弯扭失稳;当横撑间距减小至一定程度时,第一阶失稳模态变为主梁弯扭失稳(见图 7)。说明在一定横撑间距范围内,拱桥稳定系数随着横撑间距的减小而增大,当横撑达到一定密集程度,间距减小至一定值(22.8 m)时,主拱结构对全桥稳定系数的贡献达到最大,继续减小横撑间距,拱

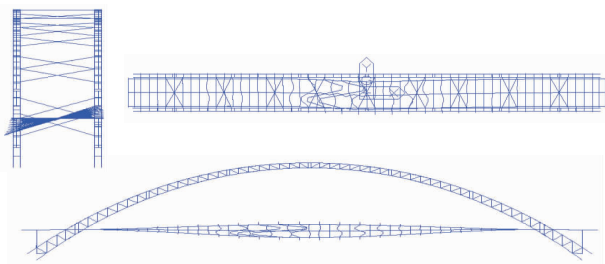


图 7 横撑间距为 22.8 和 19 m 时拱桥第一阶失稳模态

桥稳定系数保持不变。此时要提高拱桥的稳定系数,应加强主梁横向刚度,防止出现主梁弯扭失稳。

#### 4 结论

(1) 横撑形式对大跨度钢管砼拱桥稳定性的影响很大,对拱桥整体屈曲稳定性的提高程度依次为米字形>X 形>K 字形>一字形>无横撑,斜撑对拱桥屈曲稳定系数的贡献较大,宜多采用 K 字形、X 形和米字形横撑。

(2) 随着横撑刚度的增大,大跨度钢管砼拱桥的稳定系数增大。通过增大横撑截面尺寸,提高横撑抗拉压刚度,加强拱上结构的刚度,可改善大跨度拱桥的成桥稳定性。

(3) 拱肋间横撑设置较少时,大跨度钢管砼拱桥的稳定性随着横撑间距的减小而增大;横撑设置较密集时,横撑间距减小到一定程度,拱桥的稳定系数保持不变,不再增加。说明此时拱上建筑刚度已能得到保证,要改善拱桥的成桥稳定性,需从提高主梁的刚度方面考虑。

#### 参考文献:

- [1] 牛凯.大跨钢管混凝土拱桥的稳定性分析[D].长沙:长沙理工大学,2011.
- [2] 肖勇刚,雯芳.大跨度钢管混凝土拱桥弹性稳定性分析[J].中外公路,2014,34(2).
- [3] 魏建,李岩.横撑对拱桥稳定性的影响[J].四川建筑,2005(增刊).
- [4] 龚凯.单肋斜撑钢管混凝土拱桥稳定性及动力特性[D].武汉:武汉理工大学,2008.
- [5] 周亚锋.钢管混凝土拱桥的稳定性分析[D].合肥:合肥工业大学,2007.
- [6] 肖勇刚,牛凯.大跨度钢管砼拱桥结构稳定性分析[J].公路与汽运,2011(6).

收稿日期:2018-02-26

(上接第 111 页)

偏载侧的横向分布系数偏小。若采用梁格法计算双曲拱桥的横向分布系数,建议计算时考虑桥面板的横向连接作用。

(4) 双曲拱桥横向分布系数偏载侧的计算可采用刚性横梁法、连续梁支承法、梁格法,而非偏载侧数据介于刚性横梁法、连续梁支承法与梁格法之间,

在实际承载能力评定时,可综合考虑这 3 种方法。

#### 参考文献:

- [1] 范立础.桥梁工程[M].北京:人民交通出版社,2001.
- [2] 魏保立,罗旭,邓苗毅.双曲拱桥荷载横向分布系数的探讨[J].中外公路,2011,31(5).

收稿日期:2018-05-03