

DOI:10.16799/j.cnki.csdqyh.2022.01.016

# 中央索面混凝土斜拉桥索力扩散角分析

刘冠华

(中交第一公路勘察设计研究院有限公司, 陕西 西安 710075)

**摘要:** 中央索面混凝土斜拉桥斜拉索轴力在主梁断面内传递存在一定扩散角度, 扩散角影响到截面有效分布宽度, 这对于设计计算是不可忽视的点。研究确定分析方法, 引入扩散长度和轴力滞系数概念, 基于枫树坝大桥项目, 计算顶板和底板在不同扩散距离的轴力滞系数, 分析斜拉索轴力在顶板和底板的传力规律, 同时计算出在顶板和底板中斜拉索轴力的扩散角, 另外分析横隔板设置对索力扩散角的影响, 得出斜拉索轴力在顶板中扩散角约  $29.3^\circ$ , 在底板中扩散角约  $17.15^\circ$ , 斜拉索轴力在顶板的扩散速度是底板的 1.71 倍; 改变主梁横隔板设置道数, 对轴力滞系数改善较小, 对扩散角也基本没有影响。

**关键词:** 中央索面斜拉桥; 预应力混凝土箱梁; 单向三室箱梁; 索力扩散角

中图分类号: U448.27

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2022)01-0058-03

## 0 引言

中央索面预应力混凝土箱梁斜拉桥行驶视野开阔、经济性良好、建筑风格富有韵律<sup>[1,2]</sup>, 因此在主跨 250~400 m 级别斜拉桥中广泛应用。

中央索面斜拉桥由于索面布置在中央, 相比边双索面斜拉桥前者斜拉索对结构抗扭刚度贡献很小, 故一般采用单箱多室箱梁来提高结构抗扭刚度。

对于单箱多室混凝土箱梁斜拉桥, 考虑到时间成本和电脑计算能力, 一般均采用单梁模型来模拟主梁进行设计计算。由于主梁顶板宽且腹板疏薄, 故剪力滞效应明显, 另外由于拉索中央布置, 拉索轴力存在轴力扩散角, 故计算需要引入有效分布宽度来考虑剪力滞效应和斜拉索轴力扩散角的影响。

关于中央索面预应力混凝土斜拉桥的主梁剪力滞效应已经有大量学者做了研究工作, 得出一些有益的结论。

但关于斜拉索轴力扩散角计算分析, 论文成果相对较少。黄辉等<sup>[3]</sup>研究分析得出: 主梁应力分布的顺桥向影响范围均近似为 1 个梁宽, 索力对不同形式主梁的传递角度均可取  $26^\circ$ 。聂建国等<sup>[4]</sup>在对大跨度组合梁斜拉桥进行有限元分析, 研究其在恒载、运营荷载及索力作用下混凝土板内应力分布情况, 得到组合梁桥轴向力传递角度为  $27^\circ$ 。《公路钢结构桥梁设计规范》(JTG D64—2015) 附录 F.0.6 条指

出, 混凝土板承受斜拉索集中力作用时, 可认为集中力从锚固点开始向两侧按扩散角  $2 \times 33^\circ$  在混凝土板中传递<sup>[5]</sup>, 该条文整体计算时操作性不强, 且该条文针对的是组合梁斜拉桥, 对中央索面预应力混凝土宽箱梁斜拉桥需要做进一步计算分析。

关于中央索面斜拉桥索力在箱梁顶底板中的传递规律需要进一步分析, 以上研究分析结果用于指导桥梁设计和施工仍然存在一定局限性。

## 1 工程案例

枫树坝大桥为双塔中央双索面预应力混凝土箱梁斜拉桥, 跨径布置为 160 m+320 m+160 m, 约束体系为塔梁墩固结, 见图 1。

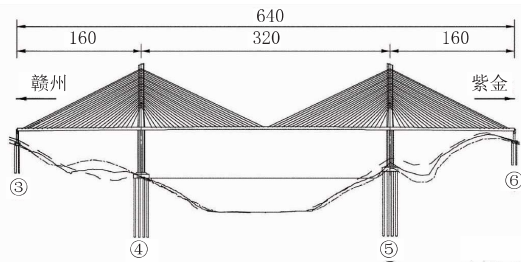


图 1 桥型布置(单位:m)

主梁采用大悬臂单箱三室断面, 箱梁顶板宽度为 28 m, 底板宽 10 m, 两侧悬臂板长 4 m, 主梁中心线处高度为 3.5 m, 见图 2。标准段箱梁中间箱室顶板厚 0.5 m, 两个边箱室的顶板厚 0.3 m, 底板厚 0.3 m, 悬臂板端部厚 0.2 m, 根部厚 0.6 m, 中腹板厚 0.5 m, 斜腹板厚 0.26 m。标准梁段只在斜拉索锚固处设置横隔梁, 标准梁段斜拉索和横隔梁纵桥向间距均为 6 m。

收稿日期: 2021-07-05

作者简介: 刘冠华(1990—), 男, 硕士, 工程师, 从事桥梁设计工作。

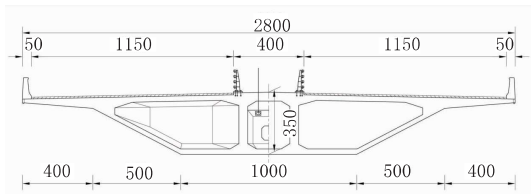


图2 标准横断面(单位:cm)

## 2 分析模型建立及研究方法

### 2.1 分析模型建立

计算斜拉索索力扩散角属于精细化分析,需要采用板单元或者实体单元。如果建立全桥板单元或者实体单元模型,模型复杂、时间成本高且对计算机性能要求高,故建立简化的多节段模型。按《公路钢结构桥梁设计规范》(JTG D64—2015)规定扩散角 $33^\circ$ 计算,距离21.56 m长度后可认为索力在截面上扩散均匀,建模节段长度在此基础上考虑扩散富裕,节段模型长度为 $8 \times 6=48$  m。

运用midas FEA软件建立有限分析模型,模型斜拉索采用桁架单元,混凝土主梁采用实体单元,网格划分均采用正六边形网格,方便后期对断面积分求合力。

模型在靠近桥塔侧主梁端部设置固结。荷载施加时仅考虑端部斜拉索水平分力,不考虑结构自重,另外为消除断面内索力水平分力竖向偏心引起的弯矩对计算结果产生干扰,在斜拉索锚点位置施加节点弯矩使整个断面处于近似轴压状态。

### 2.2 研究方法

为研究扩散角引入扩散长度和轴力滞系数概念。

扩散长度为当截面应力随着扩散距离增加截面应力不再发生变化时的扩散距离,扩散宽度为横向扩散距离,扩散角等于扩散长度除以扩散宽度。

$$\text{扩散角} = \tan^{-1} \left( \frac{\text{扩散宽度}}{\text{扩散长度}} \right)$$

轴力滞系数为断面内峰值应力除以断面内平均应力,其中断面内峰值应力根据实体有限元模型计算提取,断面平均应力根据杆系模型计算提取。

$$\text{轴力滞系数} = \frac{\text{断面内峰值应力}}{\text{断面内平均应力}}$$

中央索面混凝土斜拉索主梁横断面一般为单箱多室结构,顶底板宽度相差大,因此分别计算分析顶板和底板的扩散角和轴力滞系数,准确反应斜拉索轴力在主梁中的传力机理。

## 3 计算分析

为准确反应斜拉索轴力在顶板和底板中扩散过

程,需每隔一段距离选取研究断面,对比这些断面顶板和底板轴向应力变化情况。

### 3.1 顶板扩散角分析

根据有限元计算分析提取6个断面顶板正应力沿横桥向分布(1#~6#断面分别距离斜拉索锚点3 m、9 m、15 m、21 m、27 m、33 m),见图3。

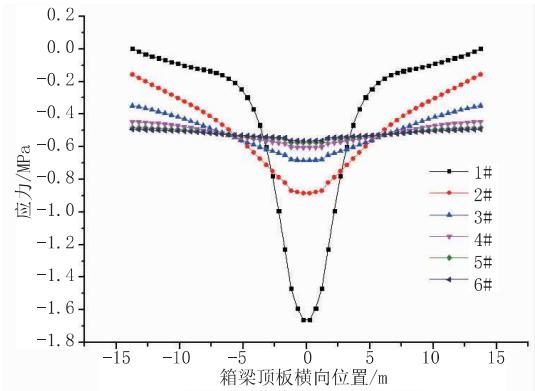


图3 关键断面顶板正应力横向分布

另外沿顺桥向选取若干断面,提取断面最大正应力,根据最大正应力除以平均应力得到各个断面顶板的轴力滞系数,见图4。

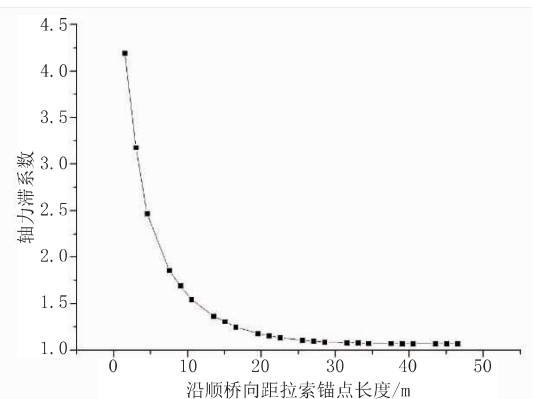


图4 不同位置顶板轴力滞系数

分析不同断面顶板正应力横向分布和顶板轴力滞系数,有以下规律:

距离拉索锚点0~10 m范围内,斜拉索轴力扩散迅速,轴力滞系数从4.2变到1.6,轴力滞系数扩散速度为0.26/m;

距离拉索锚点10~20 m范围内,截面应力横向分布变化较明显,轴力滞系数从1.6变到1.17,轴力滞系数扩散速度为0.043/m;

距离拉索锚点20~30 m范围内,截面应力横向分布趋于稳定,轴力滞系数从1.17~1.085,轴力滞系数扩散速度为0.009/m;

距离拉索锚点30 m以外,截面应力基本不发生变化,但截面应力并不是完全均匀分布,轴力滞系数为1.07。

因为顶板正应力随着扩散距离增加变化趋于缓慢,因此假设截面应力沿顺桥向变化余量不超过5%时,此刻距离拉索锚点的长度为扩散长度。根据前面计算得到扩散长度为25 m,横桥向顶板宽度为28 m,故扩散角为29.3°。

### 3.2 底板扩散角分析

与顶板扩散角计算类似,底板计算时同样提取6个断面底板正应力沿横桥向分布(1#~6#断面分别距离斜拉索锚点3 m、9 m、15 m、21 m、27 m、33 m),见图5。沿顺桥向选取若干断面,提取断面底板最大正应力,根据最大正应力除以平均应力得到各个断面的轴力滞系数,见图6。

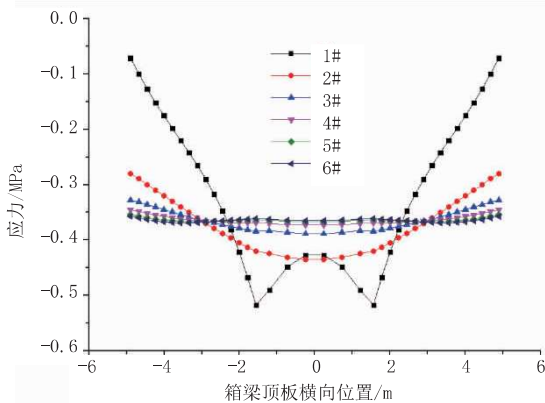


图5 关键断面顶板正应力横向分布

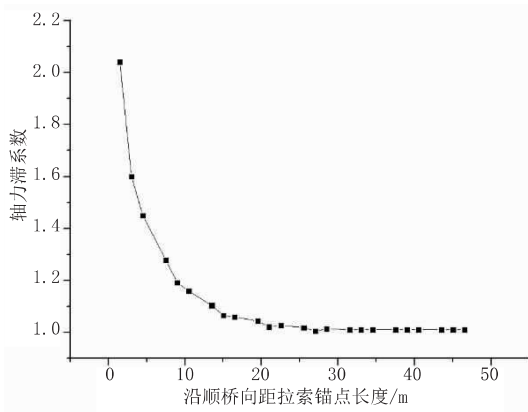


图6 不同位置底板轴力滞系数

分析不同断面底板正应力横向分布和底板轴力滞系数,有以下规律:

距离拉索锚点0~10 m范围内,斜拉索轴力扩散迅速,轴力滞系数从2.041变到1.161,轴力滞系数扩散速度为0.09/m;

距离拉索锚点10~20 m范围内,截面应力横向分布变化较明显,轴力滞系数从1.161变到1.044,轴力滞系数扩散速度为0.01/m;

距离拉索锚点20~30 m范围内,截面应力横向分布趋于稳定,轴力滞系数从1.044~1.013,轴力滞系数扩散速度为0.003/m;

距离拉索锚点30 m以外,截面应力基本不发生变化,轴力滞系数为1.01,可以近似认为截面应力是均匀分布的。

同样因为底板正应力随着扩散距离增加变化趋于缓慢,因此假设截面应力沿顺桥向变化余量不超过5%时,此刻距离拉索锚点的长度为扩散长度。根据前面计算得到扩散长度为16.2 m,横桥向底板宽度为10 m,故扩散角为17.15°。

### 3.3 横隔板对扩散影响分析

定性分析影响索力扩散角主要因素有断面高度、顶板底板斜腹板厚度,横隔板厚度和横隔板设置疏密。一方面为保证结构受力安全各板件厚度不能太小,另外一方面尽量减轻结构重量故板件厚度不能太大,因此各板件厚度可以认为是一个固定量。关于中央索面预应力混凝土箱梁斜拉桥横隔板设置通常有两种做法,一是只设置吊点横隔板,此时桥面板一般为双向板,传力较为复杂;二是吊点之间增加一道非吊点横隔板,此时桥面板一般为单向板,传力较为简单,但增加了一部分主梁重量。

为研究清楚设置横隔板对扩散角的影响,故分别计算不设置横隔板、只设置吊点横隔板和设置吊点和一道节间隔板这三种情况下扩散角,不设置横隔板为方案一,只设置吊点横隔板为方案二,设置吊点和一道节间横隔板为方案三,见表1。

表1 三种横隔板方案顶板轴力滞系数对比

位置	方案一	方案二	方案三	方案一/ 方案二	方案三/ 方案二
1.5 m	4.212	4.195	4.173	1.004	0.995
4.5 m	2.558	2.471	2.462	1.035	0.996
7.5 m	1.962	1.860	1.835	1.055	0.986
10.5 m	1.644	1.548	1.527	1.062	0.986
13.5 m	1.448	1.366	1.348	1.060	0.987
16.5 m	1.315	1.251	1.240	1.052	0.992
19.5 m	1.225	1.180	1.173	1.038	0.994
22.5 m	1.165	1.134	1.131	1.028	0.997
25.5 m	1.125	1.109	1.104	1.014	0.995
28.5 m	1.100	1.088	1.087	1.011	0.999
31.5 m	1.087	1.082	1.077	1.004	0.995
34.5 m	1.079	1.073	1.071	1.006	0.998
37.5 m	1.075	1.072	1.067	1.003	0.995
40.5 m	1.075	1.071	1.065	1.003	0.994

为避开横隔板区域的影响,故提取1.5~40.5 m范围(间隔3 m)断面作为研究对比位置。计算对比发现,随着横隔板设置道数增加,顶板轴力滞系数在各位置改善较小,在10.5 m位置,横隔板设置影响最明显,但横隔板设置道数对扩散角基本没有影响。

(下转第72页)

影响系数、构件受力相关系数; $\sigma_{ss}$ 为钢筋应力; $c$ 为最外排纵向受拉钢筋的混凝土保护层厚度; $\rho_{te}$ 为纵向受拉钢筋的有效配筋率<sup>[4]</sup>; $d$ 为钢筋直径。

由于高强钢筋能承受较大的钢筋应力,当式(17)中的钢筋直径 $d$ 不变时,钢筋应力值 $\sigma_{ss}$ 的增加会加大裂缝宽度值 $W_{cr}$ 。因此,采用高强钢筋时,应关注构件的裂缝宽度。

本桥墩身采用C50混凝土,属于偏心受压构件,在墩身顶、底截面一定范围内,墩身纵向受力主筋采用HRB500牌号的高强度钢筋,其余位置采用HRB400钢筋,可满足设计及计算要求。

## 9 其他

(1)体外预应力。为减小桥梁后期挠度,可预留体外预应力束的转向块设计,以备后期养护增设体外预应力筋。

(2)边跨预应力。由于弯折角度会影响预应力损失,箱梁边跨预应力束沿竖向多排布置时,弯折角度大则匹配短束,弯折角度小则匹配长束。

(3)节点。双肢空心墩的墩梁连接节点处,应考虑墩身主筋的延伸锚固空间。主墩与箱梁连接处,箱梁横隔板中心线与墩中心线宜重合,可沿墩壁中心线设置多道箱梁横隔板。当双肢空心薄壁墩之间设

置空心截面系梁时,应考虑系梁主筋的延伸锚固长度及其与墩身主筋的空间冲突。系梁腹板厚可小于墩身壁厚,系梁腹板中心线与墩身壁厚中心线重合,使得系梁主筋延伸于墩身主筋中间位置,避免各自主筋的空间冲突。

(4)铺装。采用悬臂浇筑法施工的箱梁,梁段连接处的连续平整性难以保证。成桥时,施工单位通过在桥面不连续处加铺混凝土层来保证平整度,增加了桥面荷载负担。因此,在桥梁设计阶段应预先考虑一定厚度(一般不小于6cm)的混凝土调平层荷载,增大计算安全储备。

## 10 结语

一座桥梁的设计过程,不是对同类桥梁的简单复制和模仿,应在满足业主需求的前提下,最大化实现桥梁本身的综合价值。桥梁设计中,应重视概念设计的作用和意义。

参考文献:

- [1] 项海帆. 桥梁概念设计[M].北京:人民交通出版社,2011.
- [2] 邓文中.能、会、美、雅—造桥艺术的境界[J].重庆:重庆交通大学学报,2011,30(2):1090-1151.
- [3] JTG 3360-01—2018,公路桥梁抗风设计规范[S].
- [4] JTG 3362—2018,公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范[S].
- [5] JTG 2231-01—2020,公路桥梁抗震设计规范[S].

(上接第60页)

## 4 结论

根据前面分析可以得出以下结论:

(1)斜拉索轴力在顶板中扩散角约 $29.3^\circ$ ,在底板中扩散角约 $17.15^\circ$ ,斜拉索轴力在顶板的扩散速度是底板的1.71倍;

(2)斜拉索轴力在顶板和底板中沿顺桥向扩散速度不是均匀的,扩散速度随着距离增加逐渐降低;

(3)随着传力距离增加,当斜拉索轴力在顶板中产生的应力分布基本不发生变化时,断面应力仍然不是均匀的,存在1.07的轴力滞系数;

(4)改变主梁横隔板设置道数,对轴力滞系数改善较小,但对扩散角也基本没有影响。

参考文献:

- [1] 刘士林,王似舜.斜拉桥设计[M].北京:人民交通出版社,2006.
- [2] 广东省西部沿海高速公路新会段有限公司.崖门大桥工程[M].北京:人民交通出版社,2004.
- [3] 万臻.斜拉桥常用截面形式主梁剪力滞效应研究[D].成都:西南交通大学,2002.
- [3] 黄辉,亢鑫,涂满明.斜拉索索力作用下不同形式混凝土主梁受力特性研究[J].世界桥梁,2018,46(6):46-50.
- [4] 聂建国,李法雄,樊建生.组合梁斜拉桥桥面有效宽度分析[J].哈尔滨工业大学学报,2007,39(2):718-724.
- [5] JTG D64—2015,公路钢结构桥梁设计规范[S].