

柔梁密索体系矮塔斜拉桥敏感参数分析

蔡小杨, 王雷, 谭卜豪

(广东省交通规划设计研究院集团股份有限公司, 广东 广州 510507)

摘要:在特定的建设条件下柔梁密索体系矮塔斜拉桥具有其独特的优势,但工程实例较少,缺乏系统性研究。该文以榕江大桥为背景,通过理论分析及有限元仿真计算,研究其构造特征及受力特点,并对斜拉索布置形式、塔高及主梁刚度等敏感参数进行系统分析。得到如下初步结论:柔梁密索矮塔斜拉桥受力特性与斜拉桥相似,可通过索力优化达到合理成桥状态;塔矮整体结构刚度低,主梁轴力及斜拉索索力相比斜拉桥要大;斜拉索布置形式对结构受力有明显影响,辐射形布置时主梁轴力最小,仅为竖琴形布置时的一半,扇形布置介于两者之间。塔高对结构受力影响显著,随着塔高降低,斜拉索使用效率降低,主梁轴力、斜拉索索力、主梁活载弯矩及挠度、斜拉索活载应力幅均有显著的增加;主梁刚度对活载作用下结构内力也有显著影响,随着主梁刚度的提高,主梁活载弯矩增大、活载挠度减小,斜拉索活载应力幅显著较小。设计时宜充分利用有限塔高,采用可改善拉索倾角的辐射形布置,适当提高主梁刚度,以获得理想的整体结构刚度,调整索梁荷载比,从而使结构受力合理。

关键词:柔梁密索体系;矮塔斜拉桥;塔高;主梁刚度;斜拉索布置;敏感参数分析

1 工程背景

榕江大桥是广东省潮(州)惠(来)高速公路的一座特大桥,跨越榕江。桥位河段通航万吨海轮,要求单孔双向通航,通航净空尺寸不小于 347 m×38 m。大桥距离揭阳潮汕国际机场仅 5 km,正对飞机跑道且位于爬升面内,机场控高要求桥梁建筑高度不得超过 96.56 m。大桥设计受航道净空和机场控高双重限制,“下顶上压”留给桥梁设计的竖向空间十分有限。更不利的是桥区位于潮汕高烈度地震区和华南沿海台风区,大桥抗风设计和抗震要求较高,桥梁截面形式和材质选择也控制桥梁设计。综合比选后创新性提出主跨 380 m 混合梁柔梁密索体系矮塔斜拉桥方案(图 1)。

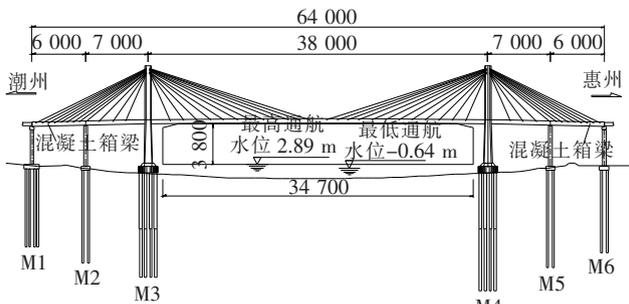


图 1 主桥桥型立面布置(单位:cm)

榕江大桥采用半漂浮体系,边跨采用混凝土梁(图 2),中跨与次边跨采用钢箱梁(图 3),门形桥塔,塔高 51.06 m,有效高跨比(塔高 H 与跨径的比值)为 1:8,仅为一般斜拉桥 1:4 的一半,就塔高来说,该桥应属于矮塔斜拉桥的范畴。为改善斜拉索的倾角,提高其使用效率,斜拉索采用辐射形布置,通过整体钢锚箱集中锚固在塔顶的内腔中。斜拉索在梁上采用不同索距布置,钢箱梁段标准间距为 15 m,为控制斜拉索吨位跨中局部 3 个梁段索距调整为 12 m;边跨混凝土梁段标准间距为 8 m,局部尾索调整为 4 m。

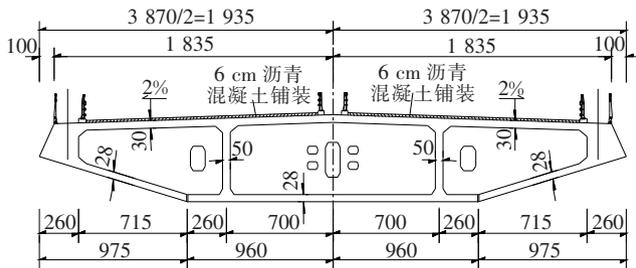


图 2 榕江大桥混凝土梁段箱梁标准横断面(单位:cm)

2 结构特点

对比图 1、4、5 可见:柔梁密索体系矮塔斜拉桥在

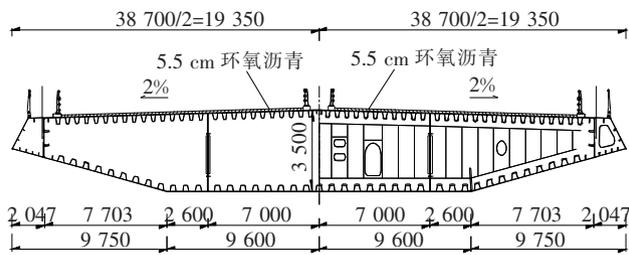


图3 榕江大桥钢箱梁段标准横断面(单位:mm)

布索形式、主梁尺寸以及受力特性等方面与传统部分斜拉桥有明显的差别,而与常规斜拉桥更为接近,只是桥塔高度矮一些。相比于常规斜拉桥,部分斜拉桥主梁梁高(刚度)要大很多,主梁以弯剪受力为主,承受大部分竖向荷载,主梁有明显无索区,斜拉索一般对称布置在边跨跨中及1/3中跨附近,索距一般为3~5 m。

柔梁密索体系矮塔斜拉桥主梁刚度与常规斜拉桥相似,主梁以受压为主,弯矩和剪力相比部分斜拉桥要小得多,竖向荷载主要由斜拉索承受,斜拉索需均布覆盖全部主梁,与常规斜拉桥更为接近;塔矮导致在相同竖向荷载作用下,主梁轴力和斜拉索索力均较常规斜拉桥要大很多,活载作用下主梁弯矩及挠度也比常规斜拉桥大。因此该文以榕江大桥为例,从斜拉索的布置、塔高及主梁刚度等几个对柔梁密索体系矮塔斜拉桥结构受力较为敏感的参数进行分析,研究不同参数对其受力性能的影响,由此确定合理体系和构造措施。

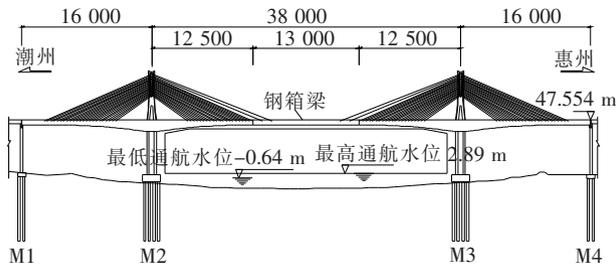


图4 传统部分斜拉桥示意图(单位:cm)

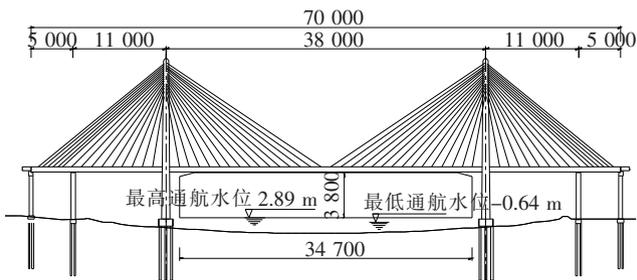


图5 传统斜拉桥示意图(单位:cm)

响。为研究方便,忽略荷载下主梁弯矩和剪力的影响,把所有斜拉索简化为索膜,假设索膜承担主梁传递过来的所有竖向荷载,计算简图如图6所示。

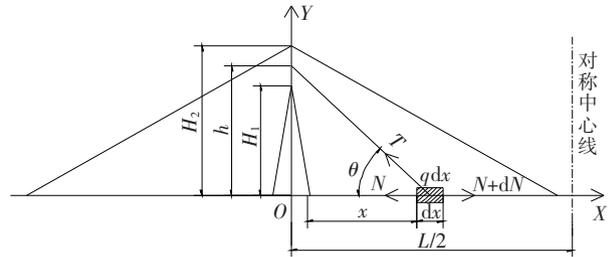


图6 作用在主梁长度 dx 上的荷载 q dx 的传递示意

由图6可得如下荷载 $q dx$ 与主梁轴力 dN 的微分关系:

$$dN = \frac{qx}{h} dx \quad (1)$$

根据图6几何关系可得 h 与 x 的关系:

$$h = \frac{2x(H_2 - H_1) + H_1 L}{L} \quad (2)$$

式(2)代入式(1)可得:

$$dN = \frac{qLx}{2(H_2 - H_1)x + LH_1} dx \quad (3)$$

当 $H_1 = H_2$ 时为典型的辐射形布置,式(3)化简积分得式(4),主梁根部截面($x=0$)轴力为式(5)。

$$N(x) = \frac{q}{2H_2} \left(\frac{L^2}{4} - x^2 \right) \quad (4)$$

$$N = \frac{qL^2}{8H_2} \quad (5)$$

当 $H_1 = 0$ 时为典型的竖琴形布置,式(3)化简积分得式(6),主梁根部截面($x=0$)轴力为式(7)。

$$N(x) = \frac{qL}{2H_2} \left(\frac{L}{2} - x \right) \quad (6)$$

$$N = \frac{qL^2}{4H_2} \quad (7)$$

综上分析可知:斜拉桥主梁轴力与塔高关系密切,呈反比关系,塔高较高斜拉索的使用效率高,主梁轴力小,塔高较矮,则主梁轴力大;斜拉索辐射形布置时主梁轴力最小,为竖琴形布置时的一半,扇形布置介于两者之间。柔梁密索矮塔斜拉桥,塔高较矮,斜拉索使用效率低,在相同的斜拉索布置形式下,主梁轴力及斜拉索索力比常规斜拉桥要大,设计时采用辐射形拉索布置,可提高斜拉索使用效率,改善结构受力。

3 斜拉索布置影响

不同的斜拉索布置形式对主梁受力有显著的影响。

4 塔高影响

为对比研究柔梁密索矮塔斜拉桥塔高对结构受力的影响。

的影响,以图 7 所示榕江大桥计算模型为基准,分别建立高跨比 1/4、1/6、1/8(推荐方案)、1/10 共 4 个模型,模型中仅改变主塔高度,其他参数不变,通过索力优化使每个计算模型均达到合理成桥状态。

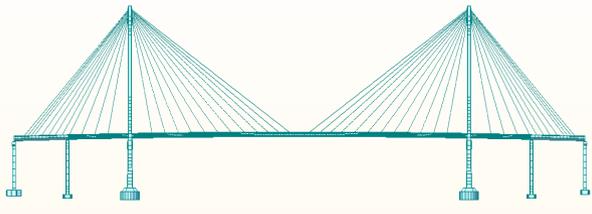


图 7 计算模型示意图

4.1 合理成桥状态结构受力情况

通过斜拉索索力优化可使不同塔高模型分别达到各自合理成桥状态(图 8),从图 8 可以看出:合理成桥状态下不同塔高对主梁弯矩影响较小,主梁弯矩十分接近。不同塔高情况下,合理成桥状态主梁轴力及斜拉索索力差别显著,如图 9、10 所示。

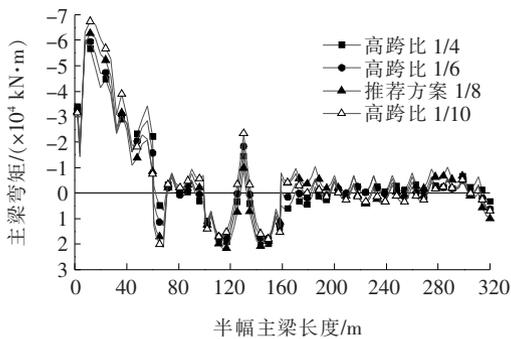


图 8 不同高跨比对主梁弯矩影响对比结果

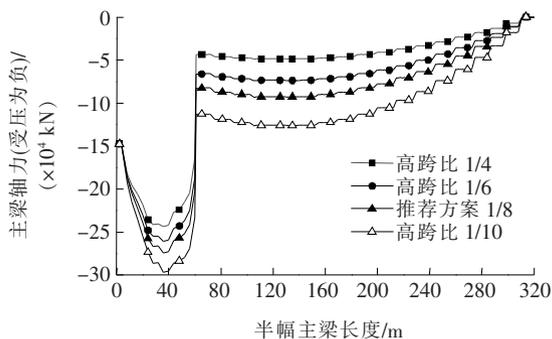


图 9 不同高跨比对主梁轴力影响对比结果

由图 9 可知:塔高与主梁轴力的关系基本上呈反比关系,塔高较高则主梁轴力较小,如高跨比为 1/10 时钢梁最大轴力是 1/4 时的 2.5 倍左右,与上述理论推导计算结论一致;边跨混凝土梁段主梁轴力比次边跨和主跨钢箱梁段主梁轴力大很多,这主要是因为混凝土梁段中施加了强大预应力所致。

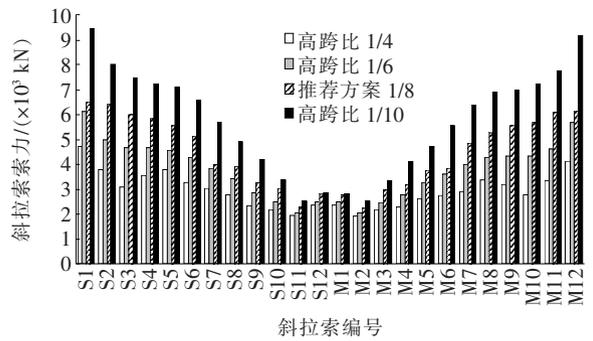


图 10 不同高跨比对斜拉索索力影响对比结果

由图 10 可知:不同塔高斜拉索倾角差异较大,塔高较高斜拉索倾角大、使用效率高,索力小,高跨比为 1/4 时索力总体最小,为 1/10 时索力总体最大,两种情况的尾索索力相差近 1 倍。

4.2 活载作用下结构受力情况

桥塔高度决定斜拉索的使用效率,决定结构整体结构刚度,不同塔高对活载下结构受力影响较大,如主梁弯矩及挠度、斜拉索索力及应力幅等差异显著。

图 11、12 为塔高对主梁活载挠度影响情况的对比结果。

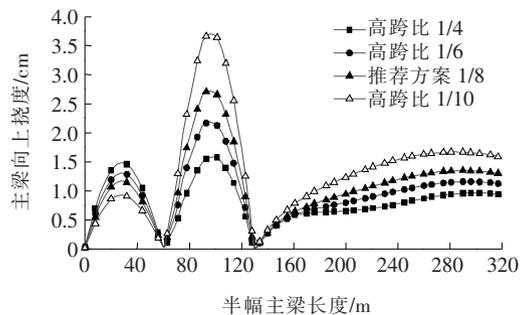


图 11 不同高跨比对主梁向上挠度影响对比结果

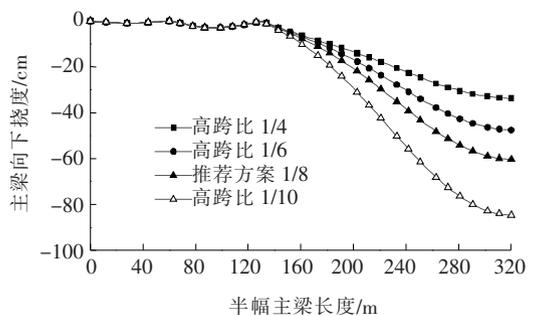


图 12 不同高跨比对主梁向下挠度影响对比结果

从图 11、12 可知:塔高较高,主梁活载挠度相比较小,反之相反;高跨比为 1/4 时主梁主跨跨中向下挠度最小,为 33.7 cm,高跨比为 1/10 时对应位置向下挠度最大,为 84.7 cm;主梁活载向上挠度整体较小。

塔高对主梁活载弯矩的影响对比结果见图 13。

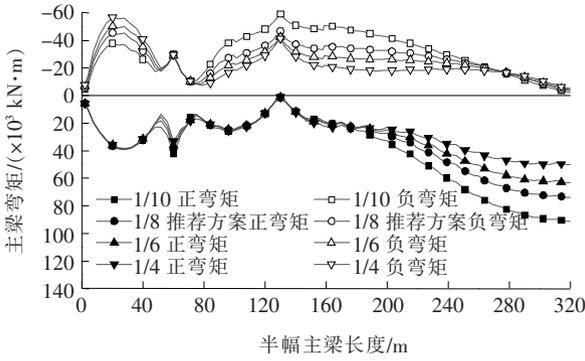


图 13 不同高跨比对主梁活载弯矩影响对比结果

从图 13 可见:塔高较高时主梁活载弯矩较小,塔高较矮时主梁活载弯矩较大,高跨比为 1/4 时主梁根部截面负弯矩为 $-41.3 \text{ MN} \cdot \text{m}$,主跨跨中截面正弯矩为 $50.2 \text{ MN} \cdot \text{m}$,高跨比为 1/10 时主梁根部截面为 $-59.1 \text{ MN} \cdot \text{m}$,主跨跨中截面为 $91.1 \text{ MN} \cdot \text{m}$,推荐方案(1/8)主梁根部截面为 $-46.8 \text{ MN} \cdot \text{m}$,主跨跨中截面为 $73.8 \text{ MN} \cdot \text{m}$ 。

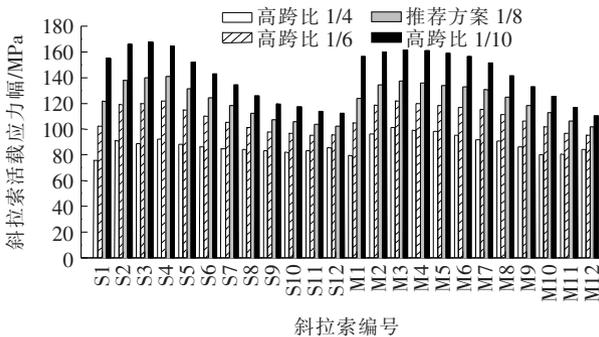


图 14 不同高跨比对斜拉索应力幅影响对比结果

塔高对斜拉索活载应力幅的影响对比结果见图 14。从图 14 可见:塔高较高时斜拉索应力幅值相比要小,塔高较矮时斜拉索应力幅值相比要大,高跨比为 1/4 时应力幅值范围为 $76 \sim 101 \text{ MPa}$,高跨比为 1/10 时为 $110 \sim 167 \text{ MPa}$,推荐方案(1/8)为 $101 \sim 141 \text{ MPa}$ 。

5 主梁刚度影响

斜拉桥主梁可以看成由斜拉索连续斜向弹性支承的连续梁,斜拉索和主梁组合共同承担竖向荷载,两者荷载分担的比例即索梁荷载比,与主梁截面弯曲刚度关系很大。柔梁密索体系矮塔斜拉桥塔矮、斜拉索倾角小效率低,拉索提供的整体刚度相比常规斜拉桥要小,主梁刚度对整体刚度的贡献度提升了。因此,有必要分析主梁刚度对结构整体受力的影响。主梁刚度与其截面高度关系密切,随着梁高的变化主梁刚度变化

十分明显,但截面面积变化不大,即主梁重量变化不大。为简化计算,只考察刚度的影响,忽略主梁重量变化的影响,在榕江大桥计算模型的基础上,设主梁刚度为原来的 4、2、0.5 与 0.25 倍 4 种情况,其他参数不变,分析研究主梁刚度对结构受力影响。

5.1 合理成桥状态结构受力情况

图 15、16 为合理成桥状态下不同主梁刚度的主梁弯矩和轴力对比结果。由图 15、16 可知:在相同成桥索力的合理成桥状态下,不同主梁刚度对主梁弯矩和轴力影响很小,甚至可以忽略不计。

5.2 活载作用下结构受力情况

主梁刚度影响索梁活载分担比例,活载作用下主梁刚度对主梁挠度影响的对比结果如图 17、18 所示。

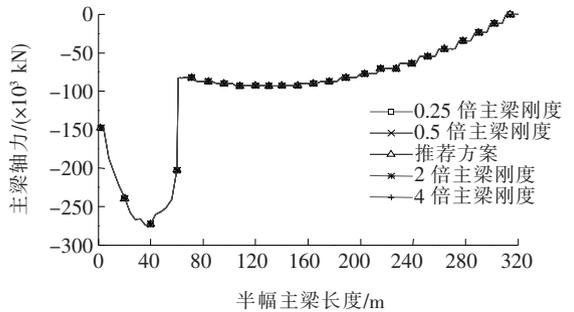


图 15 不同主梁刚度对主梁轴力影响对比结果

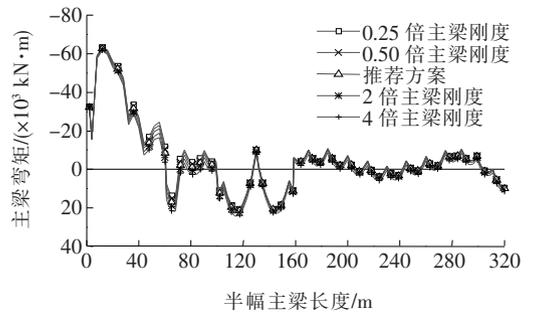


图 16 不同主梁刚度对主梁弯矩影响对比结果

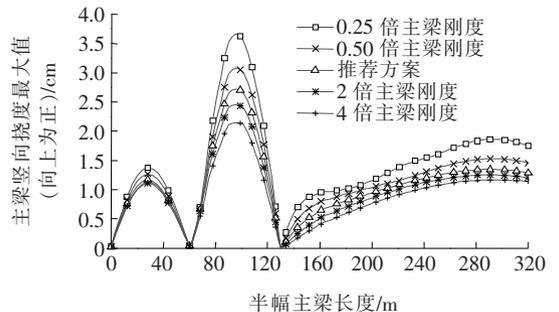


图 17 不同主梁刚度对主梁活载向上挠度影响对比结果

由图 17、18 可见:主梁刚度小,主梁竖向挠度大,尤其对主跨跨中向下挠度影响较大,对边跨及次边跨

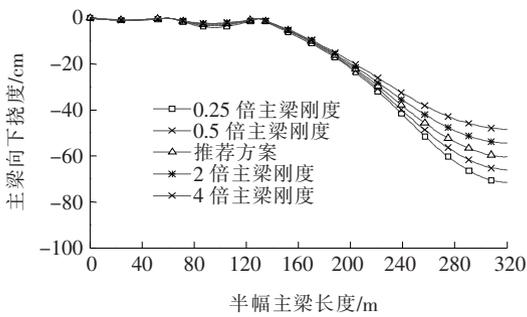


图 18 不同主梁刚度对主梁活载向下挠度影响对比结果

竖向挠度有影响,但数值不大;主梁刚度调整为 0.25 倍时主跨跨中向下挠度达到 71.6 cm,调整为 4 倍时主跨跨中向下挠度为 48.4 cm,推荐方案为 60.4 cm;主梁向上挠度次边跨比主跨要大,但整体数值不大。

不同主梁刚度对主梁弯矩影响对比结果见图 19。

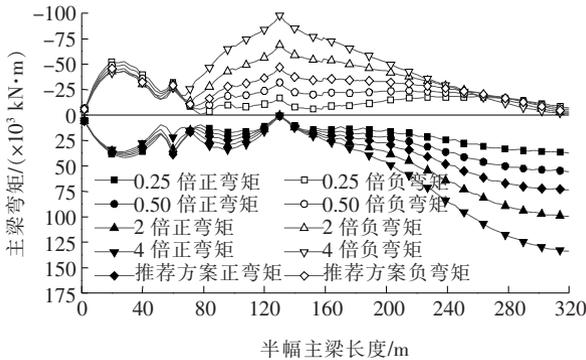


图 19 不同主梁刚度对主梁活载弯矩影响对比结果

由图 19 可知:主梁刚度小时主梁弯矩较小,主梁刚度较大时主梁弯矩较大;主梁刚度放大 4 倍时主梁主跨跨中弯矩达到 134 MN·m,主梁根部截面弯矩达到 -97.5 MN·m,主梁刚度缩小至原刚度的 1/4 时主梁主跨跨中弯矩达到 55.6 MN·m,主梁根部截面弯矩达到 -31.8 MN·m。

不同主梁刚度对斜拉索活载应力幅影响对比结果如图 20 所示。

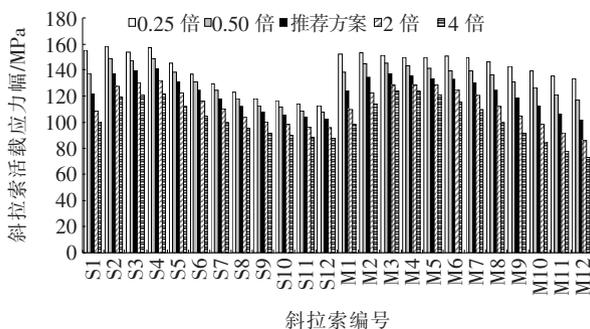


图 20 不同主梁刚度对斜拉索活载应力幅影响对比结果

由图 20 可知:主梁刚度大时斜拉索应力幅值小,主梁刚度小时斜拉索应力幅值大,主梁刚度放大至原刚度的 4 倍时斜拉索应力幅值为 73~124 MPa,主梁刚度缩小至原刚度的 1/4 时斜拉索应力幅值为 113~158 MPa。

6 结论

(1) 柔梁密索矮塔斜拉桥塔高较矮,与常规矮塔斜拉桥(部分斜拉桥)相近,但两者受力特点和构造特征却相差较远,前者力学行为和构造特征与普通斜拉桥基本相似,可通过索力优化使其达到合理成桥状态。

(2) 斜拉索布置形式对主梁轴力影响较大,辐射形布置时主梁轴力最小,仅为竖琴形布置时的一半,扇形布置情况介于两者之间。

(3) 塔高对合理成桥状态下主梁弯矩影响不大,但对主梁轴力及斜拉索索力影响较大,两者都随塔高降低而变大,主梁轴力与塔高基本呈反比关系;活载作用下,塔高对主梁弯矩、挠度及斜拉索应力幅影响明显,均随塔高降低而变大。

(4) 忽略主梁重量,主梁刚度对斜拉桥合理成桥状态的影响很小,甚至可忽略不计;活载作用下,主梁刚度对结构响应比较敏感,主梁活载弯矩随主梁刚度增加而变大,主梁活载挠度随主梁刚度增加而变小,斜拉索活载应力幅随主梁刚度增加而变小。

(5) 柔梁密索矮塔斜拉桥主塔较矮,斜拉索倾角小、效率低,结构整体刚度降低。设计时尽可能地充分利用有限塔高、采用可改善拉索效率的辐射形拉索布置、适当提高主梁刚度,以获得较为理想的结构整体刚度,调整索梁荷载比,使主梁内力、竖向挠度及斜拉索应力幅值等处于合理的设计范围。

参考文献:

- [1] JTG/T D65-01-2007 公路斜拉桥设计细则[S].
- [2] JTG/T 3360-01-2018 公路桥梁抗风设计规范[S].
- [3] 尼尔斯 J. 吉姆辛. 缆索支承桥梁—概念与设计[M]. 2 版. 北京:人民交通出版社,2002.
- [4] 项海帆. 桥梁概念设计[M]. 北京:人民交通出版社,2011.
- [5] 王雷,陈政清,梁立农,等. 榕江大桥总体设计[J]. 中外公路,2016(4).
- [6] 张亚海,朱斌,郭宝圣,等. 大跨钢箱梁斜拉桥施工期结构参数敏感性分析[J]. 中外公路,2020(5).