

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2023.10.011

单主缆悬索桥结构扭转刚度研究

代百华^{1,2}, 胡钦侠^{*1,3}, 朱金柱^{1,4}

- (1. 中交第二航务工程局有限公司, 湖北 武汉 430040;
2. 中交公路长大桥梁建设国家工程研究中心有限公司, 湖北 武汉 430040;
3. 长大桥梁建设施工技术交通行业重点实验室, 湖北 武汉 430040;
4. 交通运输行业交通基础设施智能制造技术研发中心, 湖北 武汉 430040)

摘要:为探讨不同关键设计参数对单主缆悬索桥结构整体静、动力扭转性能的影响,以广西英华大桥为工程背景,分别考虑加劲梁刚度、中跨跨径、有无外伸跨、中跨空间吊索、边跨空间吊索等参数,基于单一参数变量法建立了多种不同设计参数模式下的有限元静、动力计算模型,并对得出的计算结果进行了对比分析。结果表明:跨中处加劲梁扭转角位移随着外伸跨长度的增加而降低,结构静、动力扭转刚度均能提高,但不宜设置过长,否则对结构扭转刚度提升效果不明显;另外,设置一定长度外伸跨可保证偏载作用下桥塔处支座全部处于受压状态;增设中跨空间吊索对数,提高了结构扭转静、动力刚度,但不宜设置过多,否则提升效果有所降低,另外合理跨径设计能较好提升该类结构扭转刚度;综合可知,通过增大加劲梁自身的抗扭刚度、设置一定跨度的外伸跨及在中跨近塔处设置一定数量的空间吊索等措施可以有效提高单主缆结构的整体抗扭刚度;综合考虑汽车、人群荷载偏载以及结构扭转频率等多因素,建议单主缆悬索桥主跨合理跨径为400 m左右,跨径设置过大会大幅削弱结构扭转刚度,中跨单侧塔附近空间吊索合理对数为4~6对。

关键词:桥梁工程;扭转刚度;有限元分析;单主缆;悬索桥;空间吊索

中图分类号: U448.25

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268 (2023) 10-0087-08

Study on Torsional Stiffness of Single Main Cable Suspension Bridge

DAI Bai-hua^{1,2}, HU Qin-xia^{*1,3}, ZHU Jin-zhu^{1,4}

- (1. CCCC Second Harbor Engineering Co., Ltd., Wuhan Hubei 430040, China;
2. National Engineering Research Center for Highway & Long-span Bridge Construction Co., Ltd., Wuhan Hubei 430040, China;
3. Key Laboratory of Transportation Industry for Long-span Bridge Construction Technology, Wuhan Hubei 430040, China;
4. Research and Development Center of Transportation Industry for Intelligent Manufacturing Technology of Transport Infrastructure, Wuhan Hubei 430040, China)

Abstract: In order to discuss the influence of different key design parameters on the overall static and dynamic torsional performance of the structure of single main cable suspension bridge, taking Yinghua Bridge in Guangxi as the engineering background, considering the stiffness of the stiffener beam, mid-span, presence or absence of extended span, middle span spatial cable, edge span spatial cable and other parameters, the finite element static and dynamic calculation models in a variety of design parameter modes are established based on the single parameter variable method, and the calculated results are compared and analyzed. The result shows that (1) the torsional angle displacement of the stiffener beam in the middle of the span decreases with the increase of the extended span length, and the static and dynamic torsional

收稿日期: 2021-08-18

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2017YFC0805304)

作者简介: 代百华 (1984-), 男, 湖北洪湖人, 硕士, 高级工程师. (276419578@qq.com)

* 通讯作者: 胡钦侠 (1996-), 男, 湖北咸宁人, 硕士. (969363965@qq.com)

stiffness of the structure can be improved, but it should not be set too long, otherwise the effect on the improvement of the torsional stiffness of the structure is not obvious; (2) in addition, setting a certain length of extended span can ensure that all the supports at the bridge pylon are under pressure under eccentric load; (3) the number of pairs of mid-span spatial cable is added to improve the torsional static and dynamic rigidity of the structure, but it is not advisable to set too much, otherwise the lifting effect will be reduced, and the reasonable span design can better improve the torsional stiffness of this type of structure; (4) it can be seen that the overall torsional rigidity of the single main cable structure can be effectively improved by increasing the torsional stiffness of the stiffener beam, setting a certain span of the extended span, and setting a certain number of spatial cables at the middle span near the pylon; (5) comprehensively considering many factors such as automobile, crowd load eccentricity and structural torsion frequency, it is recommended that the reasonable span diameter of the main span of the single main cable suspension bridge is about 400 m, the torsional rigidity of the structure is greatly weakened by the span setting too much, and the reasonable logarithm of the spatial cable near the mid-span single-side pylon is 4–6 pairs.

Key words: bridge engineering; torsional stiffness; finite element analysis; single main cable; suspension bridge; spatial cable

0 引言

由于将吊索设置在加劲梁中部,单索面悬索桥造型独特、结构简洁、景观效果良好、行车视野开阔^[1]。由于仅有一根主缆,单主缆悬索桥减少了锚碇数量,可以在一定程度上降低工程造价,同时其独特的景观特点能有效提高景观效应。因此,该类桥型在城市桥梁中具有广泛的应用前景。目前,国内外建成的单主缆悬索桥仅洪都大桥^[2-4]、双拥大桥^[5-6]、渠江景观大桥^[7-8]及日本此花大桥^[9-10]等,相关研究亦较少。

图1为单主缆悬索桥和传统双主缆悬索桥加劲梁扭转受力对比示意图,梁端支承可模拟成竖向支承,吊索简化成具有一定刚度的弹性支承,因此加劲梁可简化为由支座和弹性支撑共同约束的弹性连续梁。当车道偏载、风载作用时,加劲梁将发生扭转变形,传统双主缆悬索桥的吊索力会提供抵抗扭转变形的扭转力矩,从而提高扭转刚度,降低扭转变形^[11-12]。而单主缆悬索桥的吊索力作用线通过加劲梁形心,吊索力无法提供抵抗扭转变形的约束力矩^[13-16]。

为研究单主缆悬索桥结构扭转性能,依托已建成的广西英华大桥为背景工程。从静、动力扭转刚度两方面出发,考虑加劲梁扭转刚度、有无外伸跨、中跨空间吊索、边跨空间吊索、中跨跨径等多个关键设计参数,建立一系列有限元模型,研究其对单主缆悬索桥结构扭转刚度影响程度,相关结果可为

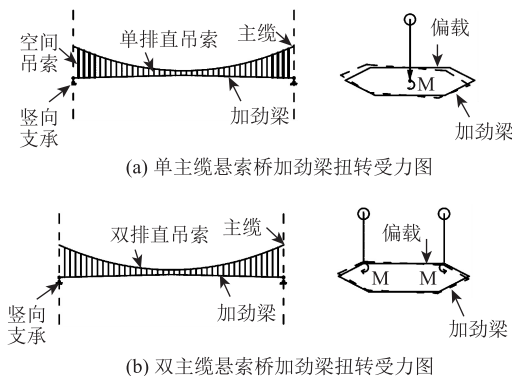


图1 加劲梁扭转受力对比

Fig. 1 Comparison of torsional forces of stiffening girder
同类桥型优化扭转刚度措施提供一定参考。

1 工程概述

广西英华大桥为单跨单主缆悬索桥,跨径布置为(45+410+45)m,如图2所示,外伸跨长度为45m,桥宽为35m,矢跨比为1:9。全桥采用单根主缆,主缆位于加劲梁中部,主跨靠近桥塔两侧分别设有4对空间吊索。大桥加劲梁选用扁平钢箱梁形式,横向宽度为37.7m,加劲梁横断面如图3所示。矢跨比为1:9,中跨近塔处各采用4对空间吊索,其余位置采用竖直吊索,吊索采用1670MPa的高强钢丝。大桥加劲梁梁端(即边跨端部)和塔柱位置处分别设置了2个竖向拉压支座,支座横向间距为20.5m,约束箱梁竖向位移和扭转。该桥设置6条设计速度为60km/h的机动车道,荷载等级为城A级^[17]。

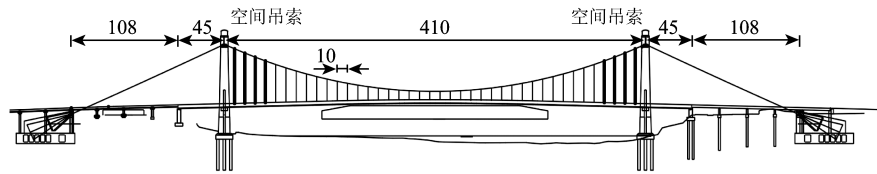


图 2 大桥立面布置 (单位: m)

Fig. 2 Elevation layout of bridge (unit: m)

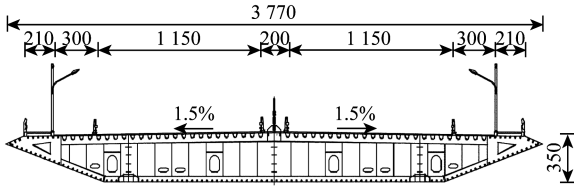


图 3 加劲梁标准断面 (单位: cm)

Fig. 3 Standard section of stiffening beam (unit: cm)

2 基准模型参数

以广西英华大桥无空间吊索和外伸跨的模型为研究基准模型, 具体参数见表 1。分别通过加劲梁扭转刚度、有无外伸跨、中跨空间吊索、边跨空间吊索、中跨跨径等关键设计参数建立一系列模型进行单主缆悬索桥结构扭转刚度影响研究。

表 1 基准模型具体参数

Tab. 1 Specific parameters of benchmark model

结构设计参数	数值
主跨长度/m	410
外伸跨长度/m	0
半跨空间吊索对数/对	0
截面扭转惯性矩/m ⁴	8.955
矢跨比	1:9
边中跨比	1:3

基于单一参数变量法, 相对应的模型说明如下所示:

(1) 在无空间吊索, 无外伸跨模型基础上, 分别建立不同加劲梁扭转刚度的模型, 研究加劲梁扭转刚度对结构扭转刚度的影响;

(2) 在无空间吊索模型基础上, 分别建立边跨长度为 0, 15, 20, 30, 35, 45, 65, 80 m 的有限元模型, 研究边跨长度对结构扭转刚度的影响;

(3) 在无外伸跨模型基础上, 分别建立在中跨设置半跨空间吊索对数为 0, 2, 3, 4, 5, 6, 8 对的有限元模型, 研究中跨空间吊索及桥塔处约束体系对结构扭转刚度的影响;

(4) 基于中跨半跨 4 对空间吊索, 外伸跨长 45 m 的有限元模型, 分别建立一侧边跨设置 0, 1,

2, 3, 4 对空间吊索的模型, 研究边跨空间吊索对结构扭转刚度的影响;

(5) 基于中跨半跨 4 对空间吊索, 外伸跨长 45 m 的模型, 分别建立中跨跨径为 200, 300, 400, 500 m 的有限元模型, 研究中跨跨径对结构扭转刚度的影响。

该桥设计为双向 6 车道, 按照《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60—2015)^[18]单向 3 车道偏心布载, 恒载考虑自重和二期恒载, 活载考虑汽车荷载和人行道荷载, 并按照 1.1 倍恒载+1.4 倍活载组合计算最不利内力情况。依托工程背景, 建立全桥初始模型。为更好地分析外伸跨、空间吊索对单主缆悬索桥扭转刚度影响, 初始模型简化为无空间吊索和外伸跨的单主缆悬索桥模型。

3 体系静力扭转刚度影响研究

3.1 加劲梁刚度影响研究

为研究不同加劲梁刚度对单主缆悬索桥结构静力扭转刚度的影响, 改变加劲梁扭转惯性矩, 建立多种不同扭转惯性矩的有限元模型。具有不同扭转惯性矩的单主缆悬索桥在活载作用下跨中处加劲梁扭转角位移如图 4 所示。

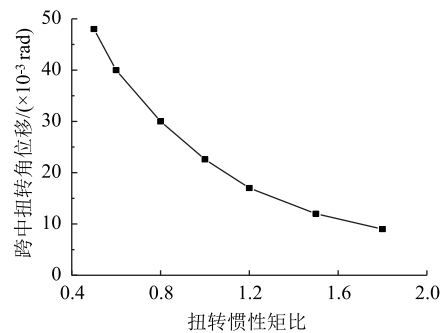


图 4 加劲梁抗扭惯性矩与跨中扭转角位移的关系

Fig. 4 Relationship between torsional inertia and mid-span torsional angular displacement of stiffening beam

由图 4 可知, 随着加劲梁抗扭惯性矩比从 0.5 变化至 1.8 的过程中, 跨中处加劲梁扭转角位移呈非线性急剧下降, 降幅达到 79%, 扭转刚度则大幅

提高,因而提高加劲梁抗扭刚度最直接的方式就是提高其抗扭刚度。而加劲梁抗扭刚度由自身截面的几何特性确定,需优化截面宽度、高度、腹板位置以及数量等参数来提高其抗扭刚度。

3.2 外伸跨影响研究

通过仅改变外伸跨长度,加劲梁质量及其他几何参数保持不变,建立多种不同外伸跨长度的有限元模型来研究不同外伸跨长度对单主缆悬索桥体系静力扭转刚度的影响,得到不同外伸跨长度的单主缆悬索桥在活载作用下跨中处加劲梁扭转角位移,如图5所示。

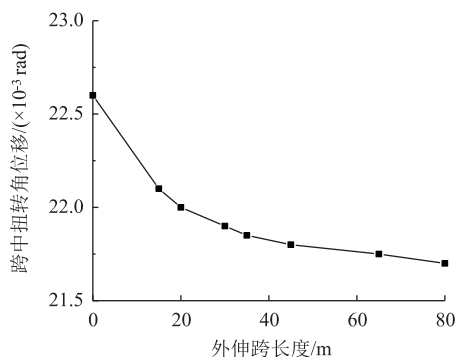


图5 外伸跨长度与加劲梁跨中扭转角位移的关系

Fig. 5 Relationship between extended span length and mid-torsional angular displacement of stiffening beam

由图5可知,随着外伸跨长度的增加,跨中处加劲梁扭转角位移有一定程度降低,扭转刚度有较好地提高,在外伸跨长度在0~45 m过程中,跨中扭转角位移由 22.6×10^{-3} rad下降至 21.7×10^{-3} rad,降幅为6%。由此可见,外伸跨的设置对单主缆悬索桥的扭转刚度有小幅度的提升作用。

对比不设置外伸跨,设置一定长度外伸跨,桥塔处支座负反力明显降低,如图6所示。当设置外伸跨长度为35 m时,桥塔处支座全部处于受压状态

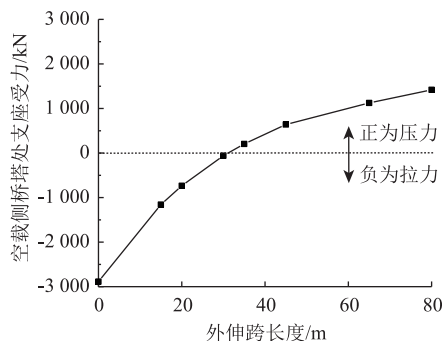


图6 外伸跨长度与空载侧桥塔处支座受力的关系

Fig. 6 Relationship between extended span length and bearing force at pylon unloaded side

态,表明通过设置外伸跨,可以明显降低单主缆悬索桥受到偏载作用时空载侧桥塔处支座负反力,保证偏载作用下桥塔处支座全部处于受压状态。

3.3 边中跨空间吊索影响研究

空间斜吊索不仅能设置在中跨,对于边跨近塔处同样可设置一定数量空间斜吊索。根据不同边中跨空间吊索数量对单主缆悬索桥结构静力扭转刚度影响研究,基于外伸跨45 m模型,仅改变边跨或中跨空间吊索对数,其中斜吊索力根据成桥状态直吊索索力进行换算,则具有不同边中跨空间吊索数量的单主缆悬索桥在活载作用下跨中处加劲梁扭转角位移如图7所示。

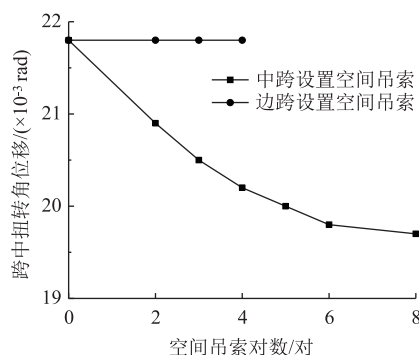


图7 中跨空间吊索与加劲梁跨中扭转角位移的关系

Fig. 7 Relationship between number of pairs of mid-span spatial cable and mid-torsional angular displacement of stiffening beam

由图7可知,随着中跨空间吊索对数的增加,跨中处加劲梁扭转角位移有一定程度降低,扭转刚度有较好地提高。在半跨空间吊索对数从0对变化至8对的过程中,跨中扭转角位移由 21.8×10^{-3} rad降低至 19.7×10^{-3} rad,降幅为11%。由此可见,中跨布置空间吊索对数对单主缆悬索桥的扭转刚度有一定提升作用,但数量不宜过多,否则提升效果有所降低,其适宜数量为4~6对。而对于边跨吊索在一侧边跨空间吊索对数由0对变化至4对的过程中,跨中扭转角变化很小,扭转刚度未得到提高。

3.4 单主缆悬索桥中跨跨径影响研究

将基于外伸跨长为45 m,无空间吊索和中跨4对空间吊索的模型,改变中跨跨径,分别设置中跨跨径为200, 250, 300, 350, 400, 450, 500 m的多种有限元模型。具有不同中跨跨径的单主缆悬索桥在活载作用下跨中处加劲梁扭转角位移如图8所示。

由图8可知,不论有无空间吊索,加劲梁跨中扭转角位移均随着中跨跨径增大呈非线性增大。当中跨跨径大于400 m时,跨中扭转角位移增幅显著,结构扭转刚度急剧减小,因而单主缆悬索桥的跨径

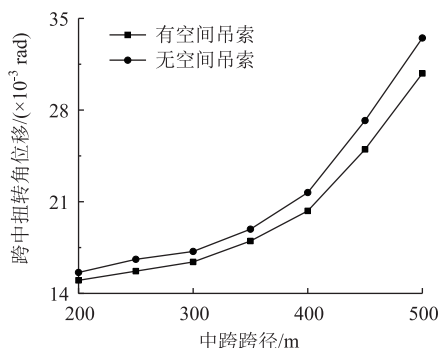


图 8 中跨跨径与加劲梁跨中扭转角位移的关系

Fig. 8 Relationship between mid-span and mid-torsional angular displacement of stiffening beam

不宜设置过大。另外相比无空间吊索，中跨跨径为 400 m 且设置 4 对空间吊索时，加劲梁跨中扭转角位移最大降幅约为 7%，对结构扭转刚度影响不大，与 3.3 节结论相对应。

4 体系动力扭转刚度影响研究

4.1 加劲梁刚度影响研究

通过仅改变加劲梁扭转惯性矩与基准扭转惯性矩之比，来分析加劲梁刚度对单主缆悬索桥结构动力扭转刚度的影响，不同抗扭转惯性矩的单主缆悬索桥计算得到的动力基频值如图 9 所示。

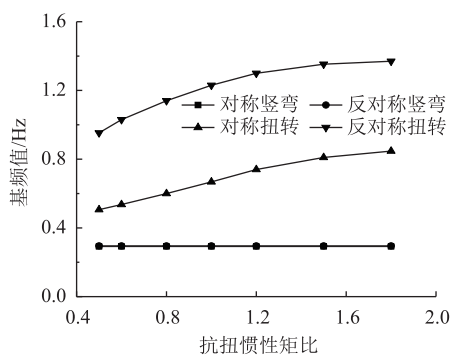


图 9 加劲梁抗扭惯性矩与竖弯、扭转基频关系

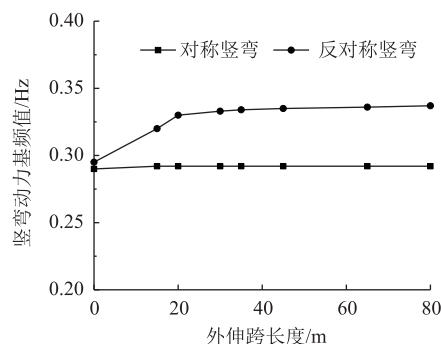
Fig. 9 Relationship among torsional inertia of stiffening beam, fundamental frequency of vertical bending and torsion

由图 9 可知，单主缆悬索桥的扭转动力刚度对加劲梁抗扭惯性矩较为敏感，竖弯动力刚度不受加劲梁抗扭惯性矩影响。在加劲梁抗扭惯性矩比由 0.5 变化至 1.8 的过程中，反对称扭转基频由 0.95 Hz 增加至 1.37 Hz，增幅为 42.1%，对称扭转基频由 0.51 Hz 增加至 0.85 Hz，增幅为 66.7%，相比之下，对称扭转基频对加劲梁抗扭惯性矩更加敏感。综上所述，加劲梁扭转惯性矩对单主缆悬索桥的动力扭转刚度影响较大，是单主缆悬索桥动力抗扭刚度的

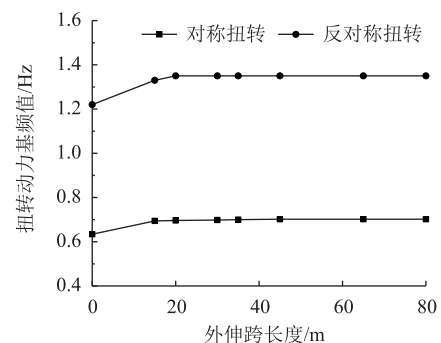
重要来源之一。

4.2 外伸跨影响研究

为研究不同外伸跨长度对单主缆悬索桥结构动力扭转刚度的影响，仅改变外伸跨长度，其长度分别取 0, 15, 20, 30, 35, 45, 65, 80 m，其他材料特性与几何特性均保持不变，得到不同外伸跨长度的单主缆悬索桥动力基频值，如图 10 所示。



(a) 外伸跨长度与竖弯动力基频的关系



(b) 外伸跨长度与扭转动力基频的关系

图 10 外伸跨长度与竖弯动力基频及扭转动力基频的关系

Fig. 10 Relationship among overhanging span length, vertical bending dynamic fundamental frequency, and fundamental frequency of torsional dynamics

由图 10 可知，反对称竖弯基频值随外伸跨长度增加先增大，当外伸跨长度达到 45 m 后达到最大值，随着长度继续增大，基频值基本不变，而对正对称竖弯基频影响则很小。扭转基频值随外伸跨长度增加而增大，当外伸跨长度达到 20 m 时提升效果明显，但随着外伸跨长度继续增大，扭转基频值基本不变。与无外伸跨长度工况相比，当外伸跨长度为 45 m 时，对称扭转基频值由 0.63 Hz 增加至 0.70 Hz，增幅为 10%，反对称竖弯基频值由 1.22 Hz 增加至 1.35 Hz，增幅为 10.6%。因此，外伸跨长度对结构扭转动力刚度有一定提升效果，但外伸跨长度不宜设置过长，设置过长提升效果不明显。

4.3 边中跨空间吊索影响研究

为进一步研究不同边中跨空间吊索数量对单主

缆悬索桥结构动力扭转刚度的影响,仅改变中跨或边跨空间吊索对数,得到不同中跨空间吊索数量的单主缆悬索桥动力基频值如图11所示。

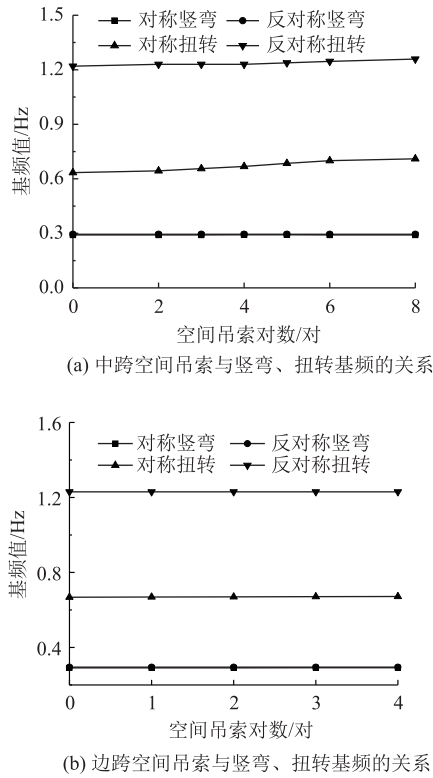


图11 中跨空间及边跨空间吊索与竖弯、扭转基频的关系
Fig. 11 Relationship among mid-span spatial cable, edge span space, vertical bending and torsional fundamental frequency

由图11(a)可知,单主缆悬索桥的正对称扭转基频和反对称扭转基频对空间吊索对数最为敏感,而对其他如正(反)对称竖弯基频影响均很小,可忽略。与不设置空间吊索扭转基频值相比,当设置在单主缆悬索桥中跨近桥塔区域对称设置8对空间吊索时,对称扭转基频值由0.63 Hz增加至0.71 Hz,增幅为11%。因此,在中跨近塔侧设置空间吊索,可一定程度上可提高扭转动力刚度。由图11(b)可知,随着边跨空间吊索对数的增加,单主缆悬索桥的扭转基频几乎没有变化,扭转动力刚度几乎不变。综上所述,边跨布置空间吊索对数对单主缆悬索桥的扭转刚度几乎没有提升作用。

4.4 单主缆悬索桥中跨跨径影响研究

本节将基于中跨半跨设置4对空间吊索、外伸跨长为45 m的模型,仅改变中跨跨径,分别建立中跨跨径为200, 250, 300, 350, 400, 450, 500 m的多种有限元模型。具有不同中跨跨径的单主缆悬索桥计算得到的动力基频值如图12所示。由图可知,

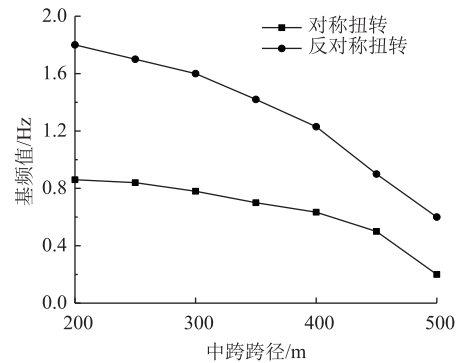


图12 中跨跨径与扭转基频的关系
Fig. 12 Relationship between mid-span and torsion fundamental frequency

随着中跨跨径的增加,单主缆悬索桥的扭转基频均有一定下降。扭转动力刚度有一定减弱,当中跨跨径大于400 m后,扭转基频值明显降低,说明扭转刚度降低较多。综上所述,单主缆悬索桥的跨径不宜设置过大,当跨径大于400 m后,结构扭转动力刚度削弱幅度明显提高。

5 外伸跨和空间吊索的耦合影响

由第3~4节内容可知,外伸跨以及中跨空间吊索均会对单主缆单索面悬索桥结构扭转刚度有一定程度影响,但前面分析均为单个参数影响分析,为更为全面分析该种结构抗扭刚度影响因素,需进一步进行中跨空间吊索对数和外伸跨长度耦合对该结构抗扭刚度影响^[19]。

基于依托工程,同样以无外伸跨、无空间吊索形态模型为研究原型,考虑以上2种参数耦合作用,建立以下模型进行桥梁结构抗扭刚度影响研究:在模型外伸跨长度为0, 15, 30, 45 m的基础上,分别在中跨设置0, 2, 3, 4, 5, 6, 8对空间吊索,研究中跨空间吊索数量、外伸跨长度耦合作用时该桥的抗扭刚度影响研究。具有不同中跨空间吊索对数和外伸跨长度的单主缆悬索桥在车道偏载作用下加劲梁跨中扭转角位移如图13(a)所示。具有不同空间吊索对数和外伸跨长度的单主缆悬索桥计算得到的动力特性值如图13(b)~(c)所示。

由图13可知:

(1) 中跨空间吊索与外伸跨耦合作用时,跨中处加劲梁扭转角位移有一定降低,结构扭转静力刚度有一定提高;

(2) 当设置外伸跨时,结构竖向动力基频值有一定提高,但外伸跨设置过长,提升效果不明显;

(3) 外伸跨与空间吊索耦合作用时,结构对称

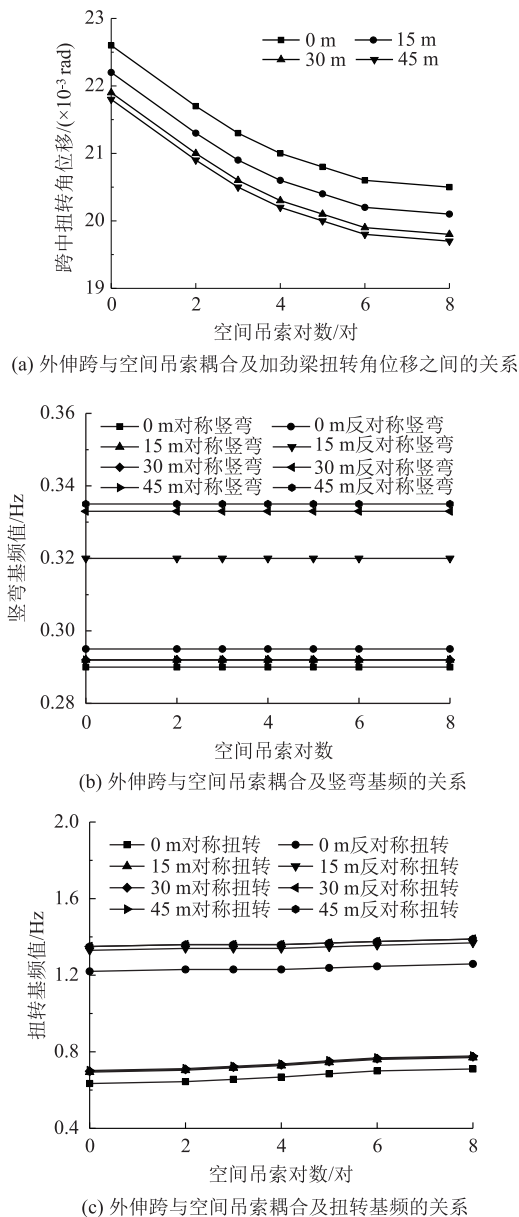


图13 外伸跨和空间吊索对结构抗扭刚度耦合影响
Fig.13 Coupling effects of extended span and space sling on torsional stiffness of structure

扭转基频值及反对称扭转基频值均有提升,但外伸跨设置过长,提升效果不明显。因此外伸跨和空间吊索耦合作用对结构扭转刚度有一定提高作用;

(4) 基于相关研究结论,英华大桥实际设计过程中,中跨近塔处设置4对空间吊索并设置45 m长的外伸跨,能一定程度提升整体结构的抗扭刚度且保证桥塔处支座处于受压状态,相关成果可为其他同类桥梁提供参考。

6 结论

以广西英华大桥为背景,对比分析了多种不同

参数对单主缆悬索桥结构扭转刚度的影响,得出以下结论:

(1) 跨中处加劲梁扭转角位移随着外伸跨长度的增加而降低,扭转基频值有一定提升,结构静、动力扭转刚度均能提高,但不宜设置过长,否则对结构扭转刚度提升效果不明显。另外,设置一定长度外伸跨可保证偏载作用下桥塔处支座全部处于受压状态。

(2) 增设中跨空间吊索对数,减少了跨中处加劲梁扭转角位移,增大了结构扭转基频值,提高了结构扭转静、动力刚度,但不宜设置过多,否则提升效果有所降低,建议其适宜数量为4~6对。同时边跨空间吊索对数对结构扭转静、动力刚度无影响。

(3) 当中跨空间吊索和外伸跨耦合作用时,单主缆悬索桥的扭转静、动力刚度能较好提升。综合考虑汽车、人群荷载偏载以及结构扭转频率等多因素建议单主缆悬索桥的合理跨径为400 m左右。

参考文献:

References:

- [1] 方振. 单索面悬索桥静力及动力特性分析 [D]. 重庆: 重庆交通大学, 2018.
FANG Zhen. Analysis of Static and Dynamic Characteristics of Single-cable Plane Suspension Bridge [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2018.
- [2] 卢永成. 洪都大桥单索面自锚式悬索桥设计构思 [J]. 中国市政工程, 2010 (3): 15-17, 91.
LU Yong-cheng. On Design Idea of Hongdu Bridge: A Self-anchored Suspension Bridge with Single Cable Plane [J]. China Municipal Engineering, 2010 (3): 15-17, 91.
- [3] 邓安泰, 陈亮. 洪都大桥主桥设计 [J]. 城市道桥与防洪, 2008 (5): 31-33.
DENG An-tai, CHEN Liang. Design of Main Bridge of Hongdu Bridge [J]. Urban Roads Bridge & Flood Control, 2008 (5): 31-33.
- [4] 徐斯林, 何超然, 彭勇, 等. 洪都大桥钢箱梁顶推施工技术 [J]. 公路与汽运, 2010 (5): 154-157.
XU Si-lin, HE Chao-ran, PENG Yong, et al. Incremental Construction Technology of Steel Box Beam of Hongdu Bridge [J]. Highways & Automotive Applications, 2010 (5): 154-157.
- [5] 林智敏, 蒋劲松. 柳州双拥大桥关键结构设计 [J]. 世界桥梁, 2016, 44 (4): 1-5.
LIN Zhi-min, JIANG Jin-song. Design of Key Components

- of Liuzhou Shuangyong Bridge [J]. World Bridges, 2016, 44 (4): 1-5.
- [6] 程桂芝. 柳州双拥大桥 50 m 高柔性顶推支墩设计与施工 [J]. 上海建设科技, 2017 (1): 4-5.
Cheng Gui-zhi. Design and Construction of 50 m High Flexible Jacking Pier of Liuzhou Shuangyong Bridge [J]. Shanghai Construction Science & Technology, 2017 (1): 4-5.
- [7] 戴天. 单索面悬索桥加劲梁架设关键技术研究 [D]. 重庆: 重庆交通大学, 2019.
DAI Tian. Research on Key Technology of Stiffening Beam Erection of Single Cable Plane Suspension Bridge [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2019.
- [8] 陈家勇, 赖亚平, 肖奎, 等. 景观桥梁 BIM 设计及应用实践—以合川渠江景观大桥为例 [J]. 公路工程, 2018, 43 (6): 102-107.
CHEN Jia-yong, LAI Ya-ping, XIAO Kui, et al. Landscape Bridge BIM Design Method and Application Practice: Take Hechuan Canal River Landscape Bridge as an Example [J]. Highway Engineering, 2018, 43 (6): 102-107.
- [9] 高小云. 日本 Konohana 桥 [J]. 中外公路, 1993, 13 (1): 30-31.
GAO Xiao-yun. Konohana Bridge in Japan [J]. Journal of China & Foreign Highway, 1993, 13 (1): 30-31.
- [10] 林荫岳. 世界上第一座自锚体系斜吊杆悬索桥: 日本此花大桥 [J]. 国外桥梁, 1993 (1): 1-4.
LIN Yin-yue. The World's First Self-anchored System Oblique Suspension Suspension Bridge: Ichiwa Bridge in Japan [J]. World Bridges, 1993 (1): 1-4.
- [11] 肖汝诚. 桥梁结构体系 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2013.
XIAO Ru-cheng. Bridge Structural System [M]. Beijing: People's Communications Press, 2013.
- [12] 柴生波, 肖汝诚, 孙斌. 双缆悬索桥体系的力学特性 (I) [J]. 华南理工大学学报: 自然科学版, 2011, 39 (12): 159-164.
CHAI Sheng-bo, XIAO Ru-cheng, SUN Bin. Mechanical Properties of Double-cable Suspension Bridge System (I) [J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2011, 39 (12): 159-164.
- [13] 李立斌, 王立彬, 李建慧. 单索面曲梁悬索人行桥主缆线形分析 [J]. 铁道科学与工程学报, 2017, 14 (10): 2162-2169.
LI Li-bin, WANG Li-bin, LI Jian-hui. Static and Dynamic Characteristics and Comfort Analysis of Curved Suspension Footbridge with Single Cable Plane [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2017, 14 (10): 2162-2169.
- [14] 李翠娟. 超大跨径 CFRP 主缆悬索桥合理结构体系研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2011.
LI Cui-juan. Study on the Rational Structure System for Super Large Span Suspension Bridge with CFRP Main Cables [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2011.
- [15] 唐茂林. 缆索承重桥梁 [M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2013.
TANG Mao-lin. Cable Load-bearing Bridge [M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 2013.
- [16] GIMSING N J, GEORGAKIS C T. Cable Supported Bridges: Concept and Design [M]. New York: Wiley, 1997.
- [17] 林智敏, 刘振宇, 陈小平. 南宁英华大桥主桥设计 [J]. 城市道桥与防洪, 2019 (8): 42-44, 75.
LIN Zhi-min, LIU Zhen-yu, CHEN Xiao-ping. Design of Main Bridge for Yinghua Bridge in Nanning [J]. Urban Roads Bridges & Flood Control, 2019 (8): 42-44, 75.
- [18] JTG D60—2015, 公路桥涵设计通用规范 [S].
JTG D60—2015, General Specifications for Design of Highway Bridges and Culverts [S].
- [19] 王鹏, 唐清华, 闫海青, 等. 空间缆索悬索桥吊索断裂时的强健性分析 [J]. 公路交通科技, 2021, 38 (4): 71-75, 91.
WANG Peng, TANG Qing-hua, YAN Hai-qing, et al. Analysis on Robustness of Spatial Cable Suspension Bridge with Fracture of Slings [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2021, 38 (4): 71-75, 91.