

文章编号:1671-6833(2010)05-0055-05

刚性悬索加劲钢桁梁桥结构参数敏感性分析

张俊光, 刘永健, 姚晓荣, 刘 剑, 张 雷

(长安大学 桥梁与隧道陕西省重点实验室, 陕西 西安 710064)

摘 要: 为了准确把握刚性悬索加劲钢桁梁桥在施工阶段及运营阶段内力和线形的变化, 以中国首座刚性悬索加劲钢桁梁桥——东江大桥为例, 采用大型有限元计算程序, 建立了三维空间有限元模型. 运用仿真分析方法, 对该结构受力特性进行了相应的研究, 得出结构自重、结构刚度、支座强迫位移、温度变化、刚性悬索线形误差等敏感参数对该桥内力及线形的影响规律. 结果表明: 支座强迫位移、结构刚度、结构自重误差对主桁线形和内力影响较大; 温度变化和刚性悬索线形误差对主桁线形及内力影响较小, 所得结果可为大桥施工控制提供参考.

关键词: 桥梁工程; 敏感参数; 有限元; 钢桁梁桥; 施工控制

中图分类号: X703.1

文献标识码: A

0 引言

刚性悬索加劲钢桁梁桥是一种新型桥梁结构形式, 由于它既克服了传统地锚式、自锚式悬索桥重力刚度小、稳定性差、抗风抗震性能差的缺点, 又继承了钢桁悬索桥双层车道布置、建筑高度小、造型美观的优点, 因此该类桥型在景观要求较高、交通量较大的地区具有广阔的应用前景. 刚性悬索加劲钢桁梁桥在受力方面结合了自锚式悬索桥和变截面连续钢桁梁桥的特点, 一方面刚性悬索直接与主桁连接在一起, 不需要巨大的锚定; 另一方面刚性悬索又相当于主桁的第三弦杆, 在中支点附近实现了截面的变化, 可以有效降低支点附近负弯矩对主桁弦杆的作用, 减少材料用量. 同时, 刚性悬索加劲钢桁梁桥由钢主桁、刚性悬索以及桥门架三部分组成受力体系, 与传统自锚式悬索桥传力途径又有所不同^[1-2].

鉴于这种桥梁结构形式在国内应用尚属首次, 与之相关的设计、施工等方面没有经验可以借鉴, 因此往往很难准确地把握该类桥梁结构在施工阶段及运营阶段的内力及线形变化情况. 所以对该类桥梁结构的参数进行有效识别, 并分析其对结构的影响十分必要. 笔者以中国首座刚性悬

索加劲钢桁梁桥——东江大桥为背景, 通过建立空间有限元仿真计算模型, 系统研究了结构自重、结构刚度、温度变化、支座强迫位移和刚性悬索线形对成桥线形和内力的影响规律, 得出的结论可为今后修建同类桥梁提供有益的理论参考依据^[3-4].

1 工程背景

东莞东江大桥是莞深高速公路与东莞环城路上跨越东江南支流的一座双层公路特大桥, 主桥采用的是双层桥面刚性悬索加劲连续钢桁梁. 该大桥全长 432 m, 跨径组成是 112 m + 208 m + 112 m. 全桥共 14 个车道, 上层的莞深高速为双向六车道, 下层的北五环路为双向八车道, 上、下层均为左右两幅桥, 每幅桥宽 16.25 m. 主桁立面采用有竖杆的华伦式桁架, 桁高 10 m, 节间长度 8 m, 上弦杆与刚性悬索之间用吊杆连接. 主桁横向采用三桁结构, 桁间距 2×18 m. 刚性悬索部分呈悬索状, 中支点处上刚性悬索中心到上弦中心高度 28 m. 主桥布置如图 1 所示.

东江大桥采用三片主桁, 为了实现三片主桁受力均匀, 在施工过程中采取了横、纵向内力调整技术, 即通过调整中桁 4 个支点的标高将中桁所

收稿日期: 2010-04-14; 修订日期: 2010-06-13

基金项目: 教育部新世纪优秀人才支持计划资助项目 (NCET-06-0855); 广东省交通厅科技项目 (2007-15); 高等学校博士点基金 (20090205110002)

作者简介: 张俊光 (1982-), 男, 山东青州人, 长安大学博士研究生, 主要从事大跨度桥梁结构分析, E-mail: zjg9829@163.com.

受内力的一部分分担到两边桁,通过调整主桁两边跨^[3-4].
端支座标高将中跨所受内力的一部分分担到两

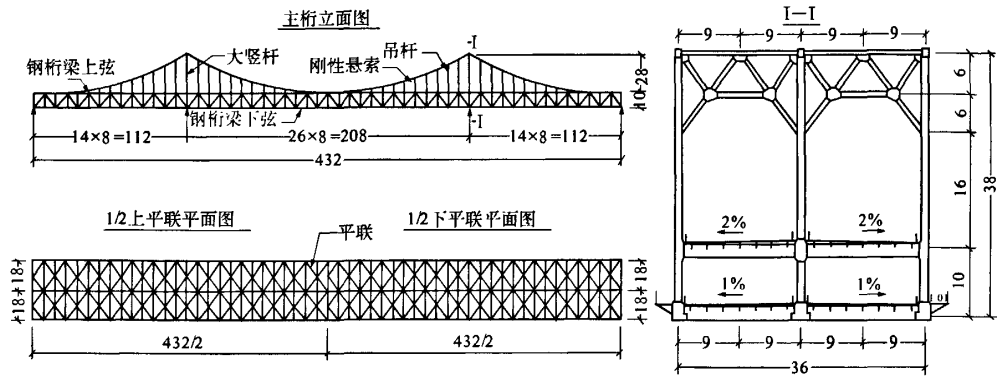


图 1 主桥布置图(单位:m)

Fig. 1 Main bridge layout

2 有限元模型

采用大型桥梁有限元程序 MIDAS/Civil 建立了东江大桥全桥空间有限元模型. 模型采用空间梁单元和板单元建模, 共有 15 058 个节点, 4 667 个梁单元, 12 096 个板单元, 见图 2, 其中桥面板采用板单元建模, 其余均采用空间梁单元建模. 模型基本参数: 主梁、刚性悬索、塔柱容重均为 76.98 kN/m^3 , 弹性模量均为 $2.06 \times 10^8 \text{ kN/m}^2$, 线膨胀系数取 1.2×10^{-5} , 泊松比 0.3; 桥面板混凝土容重为 25 kN/m^3 , 弹性模量为 $3.45 \times 10^7 \text{ kN/m}^2$, 线膨胀系数

1.0×10^{-5} , 泊松比 0.2. 边界条件为: S1, S2, N2 简化为活动支座, N1 简化为固定支座. 其中 N1, S1 为大桥中支座, N2, S2 为大桥两边支座.

针对大桥的施工特点, 对以下 5 个施工阶段和整个运营阶段进行了模拟: ①最大悬臂工况; ②拆除临时墩工况; ③横向内力调整工况; ④纵向内力调整工况; ⑤桥面板及二期恒载安装完成工况; ⑥大桥成桥运营工况. 因为在进行横、纵向内力调整之前中桁较边桁受力大, 所以本文所有误差引起的效应分析均以中桁为研究对象.

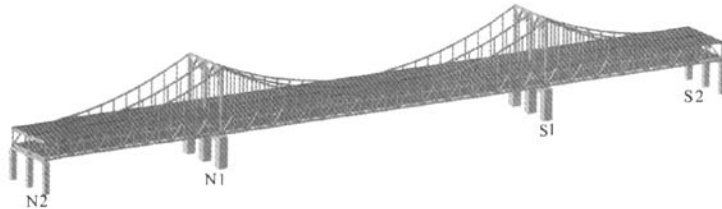


图 2 全桥有限元模型图

Fig. 2 Finite element model of total bridge

3 桥梁结构敏感性参数

3.1 结构自重

结构自重误差主要来源于杆件的自重误差和杆件成型尺寸误差. 这些误差带有随机性, 呈偏差分布, 有系统偏差的成分^[5]. 根据以往桥梁的施工经验, 结构自重普遍超过设计值, 其超出的幅度以 5% ~ 10% 左右较为常见. 该桥自重误差可分为钢桁杆件自重误差和混凝土容重误差, 计算过程可通过改变钢和混凝土的容重来达到考虑杆件

自重误差的效果, 即将材料的容重由初始值相应提高^[6-7].

3.2 结构刚度

该结构的刚度主要取决于各部分杆件以及混凝土桥面板的弹性模量 E 、截面面积 A 和惯性矩 I .

3.3 支座强迫位移

东江大桥为了实现三片主桁受力均匀, 首次采用了横、纵向内力调整技术, 即横向通过将主桁的中桁支撑点(共 4 个支点)下落 37 mm, 见图 3;

纵向通过将主桁边墩支撑点(共6个支点)下落380 mm,见图4,实现内力的均匀分配。

3.4 温度变化

桥梁结构因自然条件变化引起的温度效应通常可以分为年温差效应和局部温差效应两类。该类桥型由于整体节点刚性较大,在温度变化的情况下,其受力更趋向于刚架桥的力学特性,但是由于桁架梁桥杆件截面尺寸较小,截面四周所处的环境温度基本一致,局部温差不是很明显,所以只考虑年温差的变化^[8]。

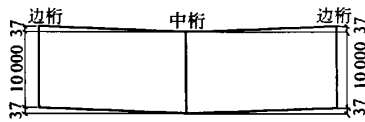


图3 横向内力调整示意图(单位:mm)

Fig.3 Lateral internal force adjustment

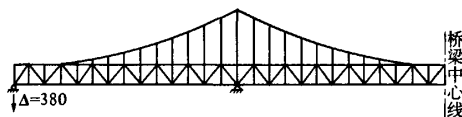


图4 纵向内力调整示意图(单位:mm)

Fig.4 Longitudinal internal force adjustment

3.5 刚性悬索线形

刚性悬索采用钢箱截面,这与传统的柔性悬索在受力方面有本质不同。刚性悬索不仅承担一部分轴力作用还承担一部分弯矩作用,而柔性悬索仅承受轴力作用。

4 结构参数敏感性分析

4.1 自重敏感性分析

由于钢桁桥存在较多的螺栓、拼接板、焊接以及混凝土桥面板浇注超方等因素影响,导致桥梁实际的自重比理论自重偏大。考虑自重偏重10%(其他参数取理论值),自重变化时主桁、刚性悬索线形和应力的变化如图5所示。由图5可以看出,自重误差将导致成桥状态下桥面下挠,跨中最为明显,最大可达到2.6 cm左右,而边跨跨中只有0.3 cm左右。对成桥阶段主桁应力的影响主要集中在中跨跨中和支座附近,最大可达11 MPa。对刚性悬索应力的影响主要集中在刚性悬索与主桁连接处,最大可达6.1 MPa。

4.2 刚度敏感性分析

桥面板混凝土弹性模量的实际值往往比规范建议值高,一方面与施工现场混凝土实际弹性模量往往偏高有关,另一方面与规范建议值偏低有关。参考相似桥型,考虑混凝土桥面板弹性模量增大10%,刚度误差对成桥之后主桁、刚性悬索线形和应力的影响如图6所示。

由图6可以看出,刚度误差对成桥之后的主桁和刚性悬索的挠度影响均较大,最大可达5 cm,对主桁上、下弦杆截面应力影响较大,可达9 MPa,对刚性悬索杆应力影响较小。这说明主桁应力、挠度对刚度误差影响较为敏感,而刚性悬索仅有挠度对刚度误差影响较为敏感。

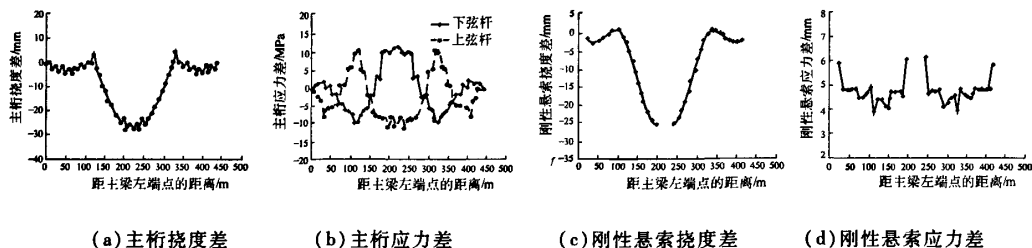


图5 自重误差效应

Fig.5 Self-weights deviation effect

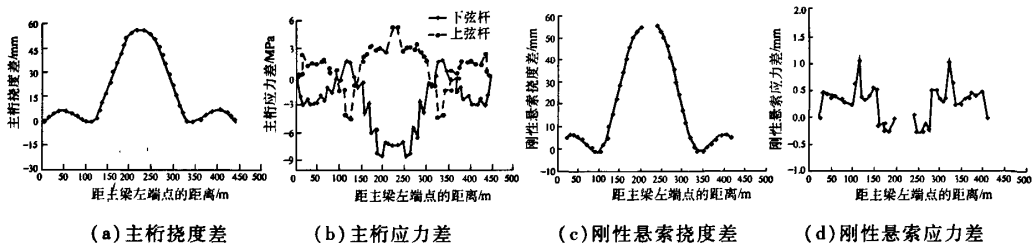


图6 刚度误差效应

Fig.6 Rigidity deviation effect

4.3 支座强迫位移敏感性分析

实际杆件之间的连接并非理想刚接,因此在内力调整时,误差对结构受力的影响不容忽视.笔者假定内力调整效果仅达到理想水平的80%,即横、纵向内力调整位移由原来的3.7 cm与38 cm变为2.96 cm与30.4 cm,支座强迫位移变化时对主桁、刚性悬索线形和应力的影响如图7所示.

由图7可以看出,支座强迫位移对成桥之后主桁和刚性悬索挠度的影响均较明显,越接近跨中,受误差的影响越大,最大可达4.1 cm,节点位移曲线自跨中对称向两侧呈抛物线变化.误差对

主桁的应力影响最大可达40 MPa,对刚性悬索的应力影响较小,最大有2 MPa,可以看出支座强迫位移误差对于刚性悬索应力的影响较小.

4.4 温度敏感性分析

结构整体升温25℃、降温25℃时,温度变化对主桁、刚性悬索的影响如图8所示.

由图8可以看出,成桥之后桥面线形受温度变化影响总体不明显,但越接近跨中温度影响越大.刚性悬索线形受温度变化影响在支座处最为明显,最大达1.1 cm.温度变化对主桁、刚性悬索应力的影响较小.

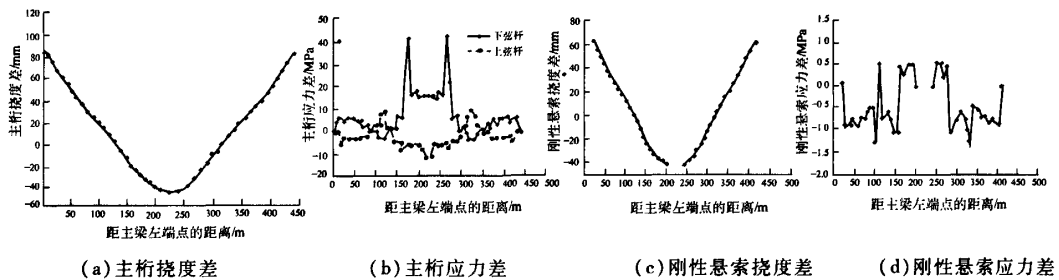


图7 支座强迫位移误差效应

Fig.7 Force-deflection of the bearing effect

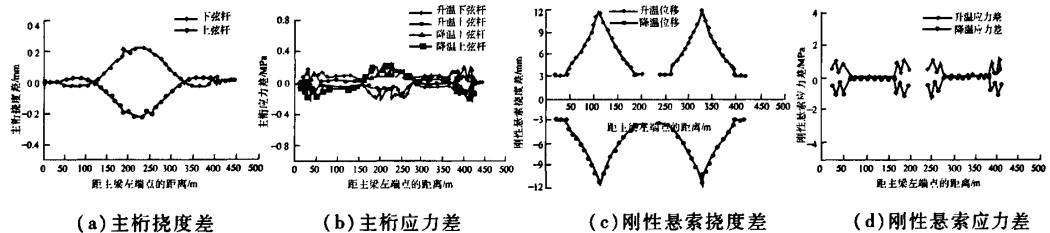


图8 温度效应影响

Fig.8 Temperature effect

4.5 刚性悬索线形敏感性分析

在刚性悬索安装时,由于主桁线形偏差以及由刚性悬索本身的制作安装误差,使得刚性悬索线形与理论线形存在误差,因此假定刚性悬索的竖向坐标与理论偏差1 cm,然后计算这种偏差对主桁内力、线形的影响如图9所示.

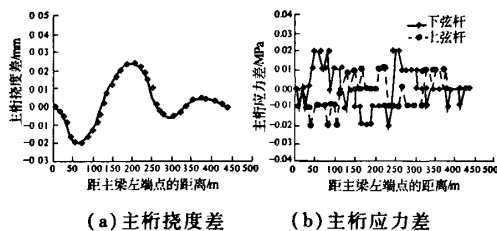


图9 刚性悬索线形误差效应

Fig.9 Rigid cable linear effect

由图9可以看出,刚性悬索线形误差对成桥之后主桁挠度和应力的影响均较小.

5 结论

(1)结构自重、刚度、支座强迫位移是敏感性参数,对主桁的线形和应力影响较大;结构自重误差对刚性悬索挠度和应力影响均较大;而刚度、支座强迫位移误差对刚性悬索挠度影响较大,对应力影响较小.由此可见,刚性悬索与主桁共同承担恒载的作用更为明显;温度、刚性悬索线形对结构线形和应力的影响相对较小.

(2)在自重误差、刚度误差、支座强迫位移误差、温度变化及刚性悬索线形误差等敏感参数影响下,边、中跨跨中处节点位移变化幅度较大,该

部位应力变化明显,建议在设计过程中对该处进行优化设计,适当增强边跨及中跨跨中附近结构节点强度。

(3)桥梁结构施工过程复杂,考虑各敏感参数的影响,能提高结构仿真计算的精度,准确地把握施工各阶段结构内力及线形变化,从而提高施工的控制精度。笔者计算结果可为该类桥梁施工控制提供参考。

参考文献:

- [1] 谭明鹤,王荣辉,黄永辉,等. 刚性悬索加劲钢桁梁桥特殊节点模型试验[J]. 中国公路学报,2008,21(1):47-52.
- [2] 林驰,刘沐宇,王海亮. 南太子湖拱形连续箱梁桥参数敏感性分析[J]. 武汉理工大学学报,2007,29(12):93-96.
- [3] 刘永健,张俊光,黄健超,等. 双层桥面三桁刚性悬索加劲钢桁梁桥全桥试验模型[J]. 建筑科学与工程学报,2008,25(3):61-65.
- [4] LIU Y J, LIU J, ZHONG G X, et al. Mechanical behavior of steel truss bridge stiffened with rigid cable in construction stage[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2009, 9(3):1-10.
- [5] 刘小燕,颜东煌,张峰,等. 预应力高强混凝土梁极限承载力分析[J]. 中国公路学报,2006,19(1):58-61.
- [6] 黄平明,王达,张永健. PC斜拉式桁架梁桥敏感参数分析[J]. 建筑科学与工程学报,2007,24(1):59-63.
- [7] 陈太聪,韩大建. 大跨度斜拉桥施工过程中的主梁节段自重识别[J]. 土木工程学报,2005,38(2):68-74.
- [8] 任翔,黄平明,梅葵花,等. 温度对悬索桥索股垂度的影响分析[J]. 郑州大学学报:工学版,2009,30(4):22-25.

Parameters Sensitivity Analysis of Steel Truss Bridge Stiffened with Rigid Cable

ZHANG Jun - guang, LIU Yong - jian, YAO Xiao - rong, LIU Jian, ZHANG Lei

(Key Laboratory for Bridge and Tunnel of Shanxi Province, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: In order to accurately grasp the variation situations of internal forces and deflection for steel truss bridge stiffened with rigid cable during the construction phase and running stage, and study the mechanical characteristics of this type of bridge, the Dongjiang Bridge in Dongguan, which is the first steel-truss bridge stiffened with rigid cable, was taken as the studying case. A three-dimensional space finite element model was built with the large-scale finite element calculation program. The related research were carried on the structure by computer simulation analysis method. The influence rules and levels of the bridge static characteristics were obtained, which were affected by the sensitivity parameters, such as self-weight, stiffness, forced-deflection of the bearing, the variation of temperature, the shape residual of rigid cable and so on. The results showed that the stiffness of structure, the self-weight of sections and the forced deflection of bearing had a greater impact on the internal forces and line shape of main truss; but the variation of temperature and the shape residual of rigid cable had a smaller affection on deflection and internal forces of main truss. These results we have got can provide reference for the construction of the bridge.

Key words: bridge engineering; sensitivity parameters; finite element; steel truss bridge; construction control