

大挑臂钢板组合箱梁矮塔斜拉桥主梁有限元分析

白光耀, 管如意, 丰鲁阳

(山东省交通规划设计院集团有限公司, 山东 济南 250031)

摘要: 以一座大挑臂钢板组合箱梁矮塔斜拉桥为背景, 利用ANSYS软件建立了“梁-实体单元”混合有限元模型, 分析该桥在正常使用极限状态和承载能力极限状态下混凝土桥面板、斜撑和钢箱梁的力学特性。结果表明: 在正常使用极限状态下, 桥面板局部存在应力集中现象, 但仍保持其受压弹性; 在承载能力极限状态下, 钢箱梁处于弹性状态; 各部件均满足相应的受力需求。建模分析与计算过程可为日后类似工程提供参考依据。

关键词: 矮塔斜拉桥; 有限元模拟; 大挑臂; 纵向受力分析

中图分类号: U442.58

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2025)04-0079-04

Finite Element Analysis on Main Girder of Large-cantilever Steel Plate Composite Box Girder Low-pylon Cable-stayed Bridge

BAI Guangyao, GUAN Ruyi, FENG Luyang

(Shandong Transportation Planning and Design Institute Group Co., Ltd., Jinan 250031, China)

Abstract: Taking a large cantilever steel plate composite box girder low-pylon cable-stayed bridge as the background, the "girder-solid unit" combined finite element model is established by the software Ansys to analyze the mechanical properties of the concrete bridge deck, diagonal brace and steel box girder of the bridge under the normal service limit state and the bearing capacity limit state. The results show that under the normal service limit state, there is the stress concentration in the part of bridge deck, but it still maintains its compressive elasticity. Under the bearing capacity limit state, the steel box girder is in an elastic state. All components meet the corresponding force requirements. This modeling analysis and calculation process can provide the reference and basis for similar projects in the future.

Keywords: low-pylon cable-stayed bridge; finite element simulation; large cantilever; longitudinal force analysis

0 引言

矮塔斜拉桥最早诞生于法国, 随后在日本得到较为广泛的应用, 其整体刚度介于连续梁桥和斜拉桥之间, 又兼具这两类桥型结构的优势, 因此近年来在国内的应用逐渐增多。

针对矮塔斜拉桥结构, 彭定成等^[1]分析时发现墩梁固结区存在应力集中的现象; 周敏等^[2]利用对塔墩梁固结区域建立局部模型的模拟方法, 获得了局部应力的分布规律; 曹忠强等^[3]对矮塔斜拉桥进行了局部应力分析, 发现塔梁的固结部位上存在主拉应力集中的现象; 安永日等^[4]研究了波形钢腹板组合箱梁矮塔斜拉桥塔墩梁固结区域的应力分布;

赵晨光等^[5]采用MIDAS FEA NX软件针对一座矮塔斜拉桥0号块的顶底板进行了精细化分析; 卫超等^[6]采用有限元程序分析了钢箱梁在施工及运营阶段的受力情况。

上述学者们对矮塔斜拉桥进行了较为广泛的研究, 但对于带有大挑臂结构的钢板组合箱梁斜拉桥研究较少。因此本文拟利用ANSYS软件建立大挑臂钢板组合箱梁斜拉桥的“梁-实体单元”混合有限元模型, 对其力学特性进行研究, 分析桥面板与钢箱梁在正常使用极限状态及承载能力极限状态下的力学性能, 以为日后类似工程提供参考依据。

1 工程概况

本文依托济南绕城高速公路二环线西环段黄河特大桥主桥工程, 其为(140+3×240+140)m钢混组合箱梁矮塔斜拉桥, 塔高40m, 塔和梁为一体浇筑, 上部结构与下部结构采用支座连接; 全桥为主梁单箱三室钢混组合箱梁, 如图1所示。其中支点梁高8.5m,

收稿日期: 2024-04-22

基金项目: 山东省交通规划设计院集团有限公司科研项目(KC.XZ-2023-013)

作者简介: 白光耀(1979—), 男, 工学硕士, 高级工程师, 从事道路与桥梁工程技术研究工作。

跨中梁高4.5 m,中间呈二次抛物线变化。

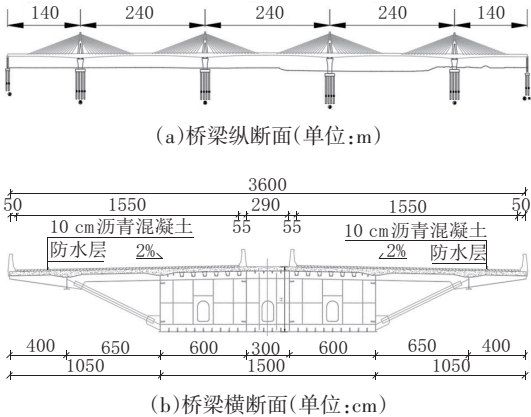


图1 桥梁断面布置图

2 建立有限元模型

2.1 几何模型

为简化分析,利用有限元软件 ANSYS 建立边跨、次边跨和 1/2 中跨的有限元模型,如图 2 所示。其中,对边塔和中塔支点附近部分节段采用实体模型建模,长度均为 30 m;次边跨的跨中部分节段也采用实体模型建模,长度同样为 30 m;其余部分采用杆系模型。

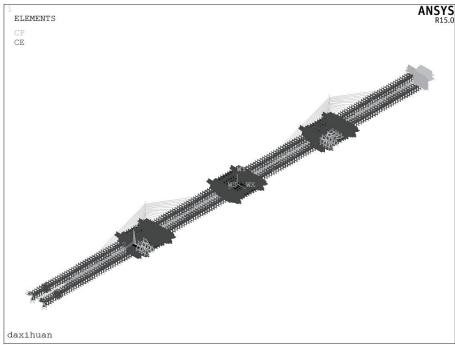


图2 有限元计算模型

2.2 单元类型

实体模型中,钢箱梁采用壳单元建模,混凝土桥面板采用实体 Solid 单元,二者之间采用共节点进行连接;预应力筋采用桁架 Truss 单元,与混凝土单元采用自由度耦合模型相互作用,预应力效应采用降温进行模拟;大挑臂斜撑杆采用梁单元,斜撑与钢箱梁及托梁之间通过建立约束方程的方式相连,如图 3 所示。

杆系模型中,主梁和桥面板均采用梁单元,按双梁模型建模;桥塔也采用梁单元,拉索采用杆单元,索力采用初应变法施加。

2.3 本构模型

主梁桥面板采用 C55 混凝土,材料参数见表 1 所列。

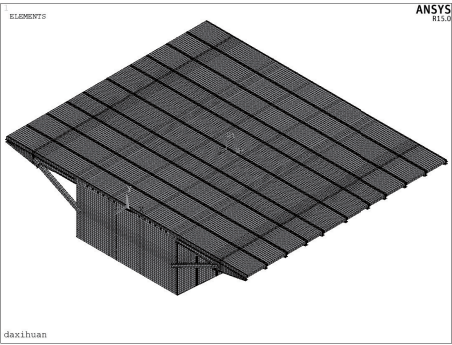


图3 中支点局部实体模型

表 1 C55 混凝土材料参数

本构参数	值
弹性模量 E_c /MPa	35 500
泊松比 ν_c	0.2
抗压强度设计值 f_{cd} /MPa	24.4
抗拉强度设计值 f_{td} /MPa	1.89

钢主梁顶板、腹板、底板采用 Q345qE 钢材,材料参数如表 2 所列。

表 2 Q345qE 钢材材料参数

本构参数	值
弹性模量 E /MPa	206 000
抗拉强度设计值 f_d /MPa	270

2.4 边界条件

模型在桥梁的中跨对称线处施加了对称边界。杆系模型与实体模型之间通过结点自由度耦合建立相互作用,拉索锚固点与杆系模型的横向联系通过梁耦合实现,杆系模型的钢箱梁与混凝土桥面板的节点之间也通过约束方程相连。

2.5 荷载组合

荷载组合考虑结构自重、桥面铺装、预应力和汽车荷载的作用。在进行纵向计算时,采用公路-I 级车道荷载加载,布置 4 个车道;在进行纵向计算时,车道荷载的纵向加载位置采用整体模型中的移动荷载追踪器功能确定,分为支点最大负弯矩工况和跨中最大正弯矩工况进行加载。

当进行正常使用极限状态下的抗裂性验算时,采用的荷载组合为频遇组合:

1.0 恒载+0.8 预应力+0.7 汽车荷载(不计汽车冲击力)。

当进行承载能力极限状态的验算时,采用的荷载组合为基本组合,其中对于纵向计算中采用的车道荷载,其基本组合为:

1.1×[1.2 恒载+1.4 汽车荷载(计算汽车冲击力)]。

3 计算结果及分析

3.1 正常使用极限状态

3.1.1 中支点桥面板应力

频遇组合下中支点处的桥面板纵桥向应力如图 4 所示。由图可见,频遇组合下,桥面板的最大纵向压应力约为 12 MPa,且纵向未出现拉应力;与桥塔连接处的混凝土桥面板压应力较大,但除此之外的桥面板纵向压应力分布较均匀,大致在 8 MPa 以下,满足限值要求。

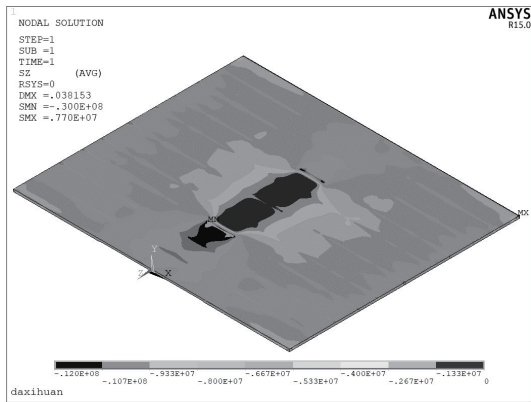


图 4 频遇组合中支点桥面板上缘纵向应力(单位:Pa)

频遇组合下,中支点处的桥面板主拉应力如图 5 所示。由图可见,在桥面板的中部位置出现了一些应力较为集中的区域,但其余大部分区域的主拉应力分布较为均匀,桥面板单元的主拉应力在 1.1 MPa 以下。

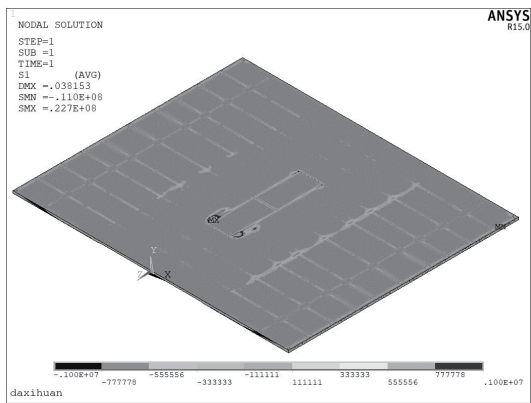
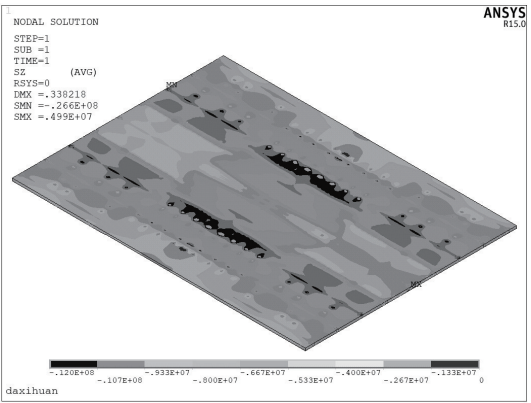


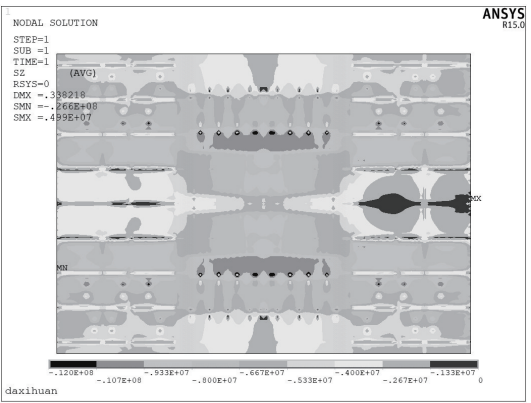
图 5 频遇组合中支点桥面板上缘主拉应力(单位:Pa)

3.1.2 跨中桥面板应力

频遇组合下,跨中处的桥面板纵桥向应力如图 6 所示。由图可见,桥面板上下缘应力分布呈现较高的不均匀性,且桥面板压应力沿桥面板纵向中心线对称分布,桥面板的最大纵向压应力约为 12 MPa。验算得出桥面板上压应力储备充足,且纵向未出现拉应力。



(a)上缘应力



(b)下缘应力

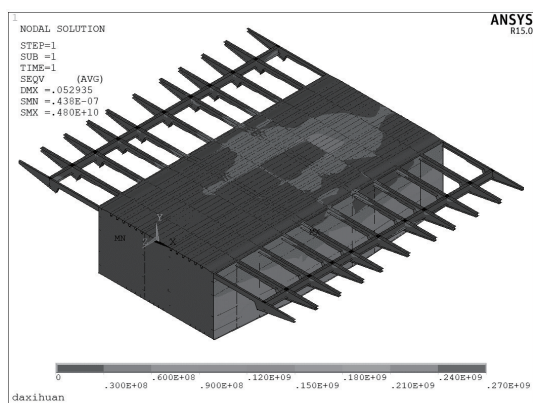
图 6 频遇组合跨中桥面板应力(单位:Pa)

频遇组合下,根据跨中处桥面板的主拉应力结果显示,发现除了钢束锚固点附近的部分区域出现应力集中的现象外,桥面板其余部分上下缘的应力分布均较为均匀,计算结果显示主拉应力基本在 1.33 MPa 以下。

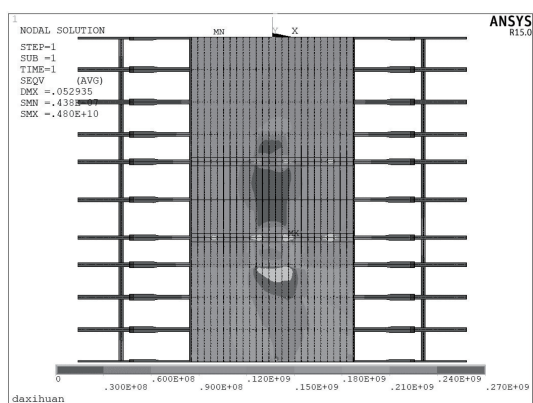
3.2 承载能力极限状态

3.2.1 中支点钢箱梁应力

基本组合下,利用有限元软件计算出中支点处钢箱梁的上缘、下缘 Mises 应力,如图 7 所示。由图可知,在中支点位置,钢箱梁上下缘的应力分布不均匀,上缘最大与最小应力相差约 90 MPa,下缘最大与最小应力相差约 180 MPa。此外,计算发现,钢箱梁的上缘应力普遍小于其下缘应力,钢箱梁上缘的应力水平较低,在 90 MPa 以下,而下缘大部分区域的应力分布在 60~240 MPa 之间;在靠近桥塔的箱梁处,由于轴力较大,同时由于未考虑内填混凝土的抗压作用,所得应力略微超过 270 MPa;但除了支座附近节点及与桥塔连接处存在部分应力集中区域外,中支点处钢箱梁的 Von Mises 应力在 270 MPa 以下,未超过材料设计强度。



(a)上缘应力



(b)下缘应力

图7 基本组合中支点钢箱梁应力(单位:Pa)

3.2.2 跨中钢箱梁应力

基本组合下,利用有限元软件计算得出跨中处钢箱梁的 Von Mises 应力,发现跨中处钢箱梁的应力分布规律与中支点处相似,都存在应力分布不均匀的情况,且上缘应力普遍小于下缘。此外,上下缘的最大与最小应力相差较大,均在 100 MPa 左右,钢箱梁上缘大部分区域的应力分布在 51.1~153 MPa,钢箱梁下缘的大部分区域应力分布在 128~230 MPa。跨中处钢箱梁的最大 Von Mises 应力约为 230 MPa,未超过材料设计强度。

3.2.3 斜撑上下节点受力分析

基本组合下,斜撑上节点局部的等效应力如图8所示。由图可见,斜撑上节点板与节点板加劲肋连接处出现了局部应力集中,但除了应力集中区域外,斜撑上节点附近区域的应力水平平均分布在 117 MPa 以下;在托梁腹板与斜撑的连接区域,应力水平大致分布在 50~117 MPa,应力较小。

斜撑下节点局部的等效应力如图9所示。由图可见,斜撑下节点板与斜撑及加劲肋连接部位的应力达到了约 120 MPa,节点板其余部位的应力均在约 107 MPa 以下;箱梁腹板与斜撑连接处的应力分布在

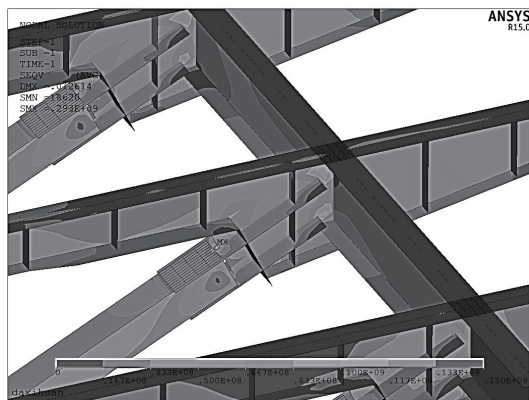


图8 斜撑上节点局部等效应力(单位:Pa)

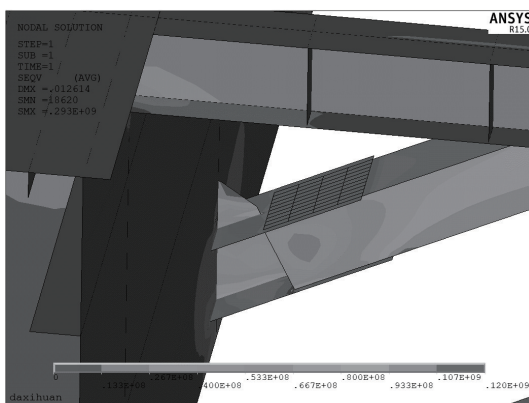


图9 斜撑下节点局部等效应力-俯视图(单位:Pa)

4 结 语

本文利用 ANSYS 软件对大挑臂钢板组合箱梁斜拉桥主梁的力学特性进行研究,具体分析了桥面板与钢箱梁在正常使用极限状态及承载能力极限状态下的力学性能,得到主要结论如下。

(1)在正常使用极限状态下计算工况,得到中支点位置的桥面板在纵向保持受压弹性,主拉应力分布存在应力集中现象,桥塔处桥面板的压应力较大;跨中处的桥面板在纵向同样保持受压弹性,且压应力沿桥面板纵向中心线对称分布。

(2)在承载能力极限状态下计算工况,得到中支点位置的钢箱梁上下缘应力分布不均匀,起伏较大,但除了部分应力集中区域应力略微超过设计强度外,其余部位的钢箱梁处于弹性状态;跨中处的钢箱梁处于弹性状态,且应力分布规律与支点处类似,起伏亦较大;斜撑各部位均保持弹性,且尚有一定富余,满足受力需求。

(下转第 107 页)