

DOI:10.16799/j.cnki.esdqyfh.2022.01.020

# 斜拉桥钢-混结合段力学行为仿真分析

班长凯

(天津市政工程设计研究总院有限公司, 天津市 300392)

**摘要:**以山东省济宁市龙拱河特大桥为研究对象,首先借助专业软件 Midas/Civil 建立整体梁单元模型,以确定钢-混结合区域的内力数值;然后基于有限元软件 ABAQUS,建立钢-混结合段的三维板壳实体模型进行精细化分析,明确该区段钢箱梁、混凝土横梁的应力场分布。研究表明:该桥主梁钢-混结合段的刚度过渡平顺,传力机制合理,安全储备良好,能够满足桥梁的受力需要,保证斜拉桥的结构安全。

**关键词:**斜拉桥;钢-混结合段;有限元方法;局部分析

**中图分类号:** U442.5

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1009-7716(2022)01-0076-03

## 0 引言

近年来,钢-混凝土混合梁斜拉桥在世界各地得到了广泛应用,其充分利用、发挥了钢材和混凝土两种材料的不同特性而集诸多优势于一身。

钢-混结合段承担着将钢梁段的内力合理、有效地传递到混凝土梁段的重任,因此,作为混合梁斜拉桥的关键受力部位,国内外学者对其力学性能和传力机理展开了多方面的研究<sup>[1]</sup>。陈君等<sup>[2]</sup>以南京秦淮新河桥为研究对象,建立了混凝土梁段+结合段+钢梁段的有限元模型,分析了钢-混结合段在各加载工况下的应力场分布规律以及荷载在钢-混结合段内的传递路径;李小珍等<sup>[3]</sup>通过对厦门马新大桥钢-混结合段的缩尺模型进行加载,研究了试验梁段在各加载方案下的力学行为,并结合数值模型对其传力机理进行了分析;唐亮等<sup>[4]</sup>针对混合梁斜拉桥,通过有限元方法,分析了钢-混结合段有格室-后承压板构造的受力特点,并对抗剪连接件刚度、后承压板厚度、格室长度及高度、加强段长度等参数影响进行了较为系统的研究。

本文以山东省济宁市龙拱河特大桥(简称龙拱河特大桥)为研究背景,基于有限元软件 ABAQUS 建立斜拉桥主梁钢-混结合段的精细化有限元模型,研究这一区段的局部应力分布规律,为今后该类桥梁的设计、分析提供一定的参考。

收稿日期: 2021-03-23

作者简介: 班长凯(1993—),男,硕士,助理工程师,从事桥梁设计工作。

## 1 工程概况

龙拱河特大桥主桥为 40 m+60 m+220 m+60 m+40 m 半飘浮体系斜拉桥,北侧引桥为 2 m×30 m 预应力混凝土连续现浇箱梁,南侧引桥为 4 m×30 m 预应力混凝土连续现浇箱梁,桥梁全长 600 m。主桥桥面宽 27.9 m,引桥桥面宽 25.5 m。斜拉桥主梁采用混合梁方案,即主跨采用钢箱梁,以减轻自重,增大跨越能力,方便施工;边跨采用预应力混凝土箱梁进行配重,以提高全桥刚度;钢-混结合段设置在主跨距离索塔中心 6.5 m 位置处。龙拱河特大桥钢-混结合段采用有格室-后承压板式构造,贯穿混凝土横梁的预应力钢束锚固在承压端板上,并在钢-混结合段顶底板、承压板以及格构板上布置焊钉,焊钉直径为 22 mm,长 170 mm。钢-混结合段基本构造见图 1。

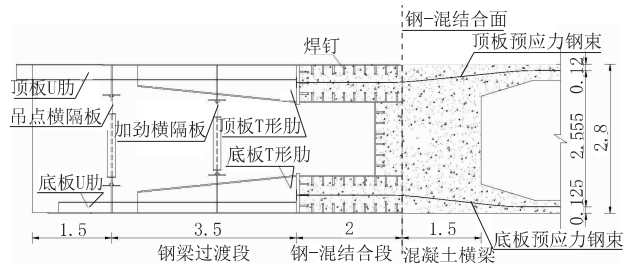


图1 钢-混结合段基本构造(单位:m)

## 2 钢-混结合段有限元模型建立

本文基于有限元软件 ABAQUS,对龙拱河特大桥钢-混结合段进行数值模拟分析。

### 2.1 材料属性与单元选取

钢-混结合段钢箱梁、横隔板、加劲板、承压板、格构板、焊钉、预应力钢束等钢材属性均采用弹性本

构关系,其中采用壳单元 S4R 模拟钢箱梁、横隔板、承压板以及格构板;由于焊钉数目众多,采用桁架单元 T3D2 建立焊钉模型将有效改善网格划分质量以及提升模型运算速度;预应力钢束采用桁架单元 T3D2 进行模拟。钢-混结合段混凝土取弹性本构模型,并采用实体单元 C3D8R 建立混凝土梁段。模型计算参数选取如表 1 所示。考虑到计算效率,未在模型中建立普通钢筋。

表 1 模型材料参数表

材料	弹模 $E_s/\text{MPa}$	泊松比 $\nu$	单元选取
混凝土	$3.55 \times 10^4$	0.20	实体单元, C3D8R
钢材	$2.06 \times 10^5$	0.31	壳单元, S4R
焊钉连接件	$2.06 \times 10^5$	0.31	桁架单元, T3D2
预应力钢束	$1.95 \times 10^5$	0.31	桁架单元, T3D2

## 2.2 约束与接触关系

由于钢-混结合段混凝土采用 C60 微膨胀混凝土,因此建模时假定钢板与混凝土之间紧密结合,同步受力,变形协调。因此,钢箱梁顶底板、承压板、格构板与混凝土之间采用 Tie 接触关系。焊钉连接件、预应力钢束采用 embedded 功能处理,即将钢构件单元与周围接触混凝土在适当位置建立自由度约束关系。

## 2.3 边界条件与荷载施加

依据圣维南原理,距离钢-混凝土结合部位较远位置的应力幅值对钢-混结合段受力影响较小。建模过程中,各部件均按实际尺寸进行模拟,并在钢-混结合区域向两侧延伸一部分来消除耦合约束和端部固结对钢-混结合段应力场的影响<sup>[5]</sup>。

按照设计位置进行预应力钢束的布置,并通过降温法来实现预应力的施加。分析模型中,混凝土梁端采用固端约束,在钢箱梁端部施加内力。根据钢箱梁截面形式,无法直接施加集中力,因此在钢箱梁端部截面形心对应位置建立一个参考点,借助 ABAQUS 中的 Coupling 功能将钢箱梁端部截面上各节点的自由度与截面形心参考点进行耦合,通过参考点施加内力组合。

加载内力组合通过全桥梁单元模型提取,选取最不利的频遇组合(1.0 恒载+0.7 活载+1.0 整体温度(包络)+0.8 梯度升降温(包络)+0.75 风载)作为加载工况。

## 2.4 数值模型建立

针对龙拱河特大桥钢-混结合段的结构形式,建立钢-混结合段有限元精细化模型(见图 2),模型共 530 820 个单元。



图 2 钢-混结合段有限元精细化模型

## 3 受力性能分析

### 3.1 焊钉连接件受力性能

龙拱河特大桥钢-混结合段顶底板、承压板及格构板焊钉为等间距布置,顶底板沿纵向布置的焊钉应力分布不均匀。现提取轴向力作用下沿格室顶板纵向布置的焊钉根部应力,将其传力情况绘于图 3 中。

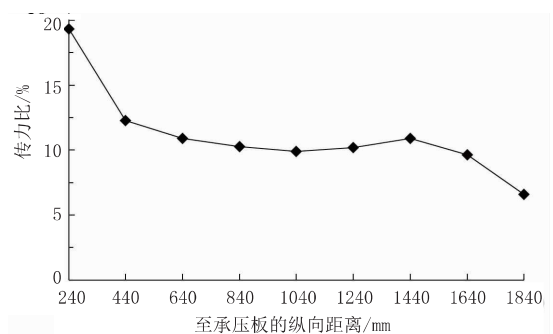


图 3 纵桥向焊钉传力比例

通过有限元分析,提取内力频遇组合作用下的焊钉 Mises 应力(即轴向应力)。焊钉 Mises 应力云图见图 4。由图 4 可知,由于承压板与结合段混凝土同步变形,靠近预应力钢束锚固区的焊钉根部应力水平较高。

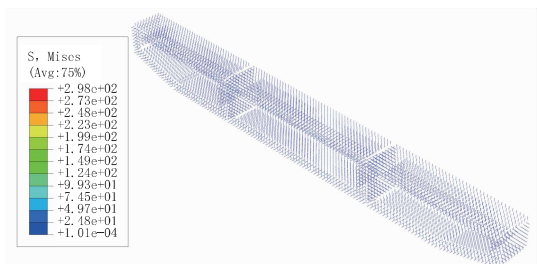


图 4 焊钉 Mises 应力云图(单位:MPa)

### 3.2 混凝土梁段受力性能

为提高整体模型计算效率及收敛程度,在模型分析中未考虑锚垫板、锚下螺旋筋、锚下加强筋等构件的作用,因此钢-混结合段混凝土预应力钢束锚

固区域应力水平较高,顺桥向压应力最大值为32.5 MPa。钢-混结合段混凝土顺桥向正应力云图见图5。

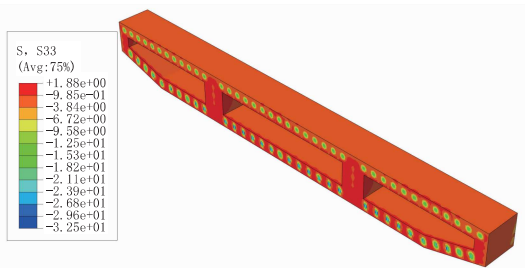


图5 钢-混结合段混凝土顺桥向正应力云图(单位:MPa)

钢-混结合段混凝土最大主应力分布云图见图6。由图6可知,其拉应力主要分布在钢束锚固端,最大主拉应力值为3.84 MPa。

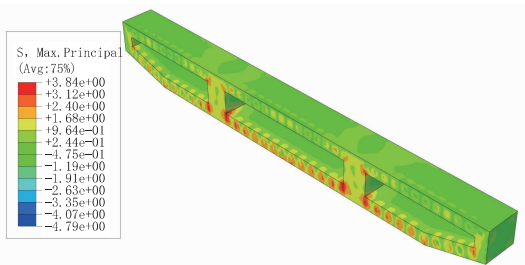


图6 钢-混结合段混凝土最大主应力云图(单位:MPa)

为降低这一区域的应力水平,预应力钢束贯穿混凝土与钢箱梁结合段锚固时,除与锚具配套的锚垫板由承压端板代替外,锚下螺旋筋等其余构件均应相应设置,以防止梁端锚固区域由于预应力张拉产生的拉应力超过混凝土的抗拉强度而开裂。

混凝土箱梁顺桥向正应力云图见图7。

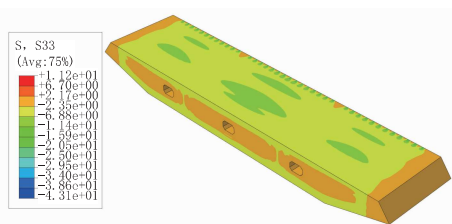


图7 混凝土箱梁顺桥向正应力云图(单位:MPa)

由图7可知,除约束施加截面位置,即预应力钢束锚固端外,混凝土箱梁整体应力水平较低。

### 3.3 钢箱梁段受力性能

钢-混结合段钢梁 Mises 应力分布云图见图8。

钢-混结合段钢梁整体应力水平较低,只有承压板预应力钢束开孔位置局部应力较大,原因是结

合段钢梁通过焊钉连接件与混凝土横梁紧密连接、协同受力。

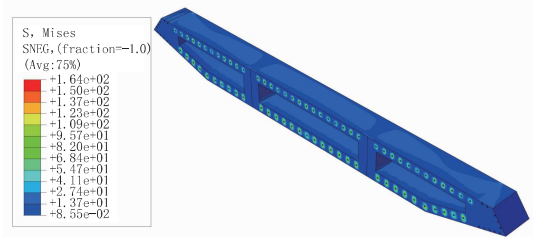


图8 钢-混结合段钢梁 Mises 应力云图(单位:MPa)

钢箱梁过渡段的 Mises 应力(见图9)最大值分布在顶底板的加劲 T 形肋与 U 肋的断面连接处,即刚度突变位置,这一区域应力集中现象较为突出。

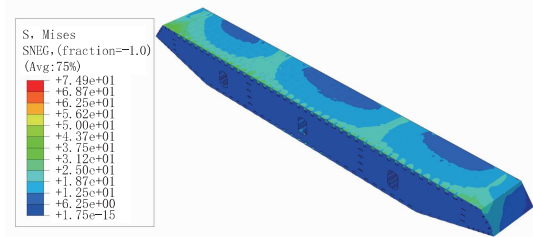


图9 钢箱梁过渡段 Mises 应力云图(单位:MPa)

## 4 结语

(1)焊钉连接件纵桥向应力分布不均匀,靠近承压板位置的焊钉根部应力水平较高,在设计过程中应注意优化配置。

(2)设计时,承压板预应力钢束锚固位置应注意锚下加强构件的设置,以降低该区域的应力水平。

(3)在钢箱梁过渡段顶底板的刚度过渡加劲肋(即加劲 T 肋)与等高 U 肋的截面突变位置,应力集中现象较为突出。

### 参考文献:

- [1]姜文.混合梁斜拉桥钢混结合段受力分析[D].长沙:湖南大学,2016.
- [2]陈君,黄国红,徐天,等.混合连续梁桥钢混结合段局部应力分布及传力机理分析[J].山东交通学院学报(自然科学版),2020,28(2):24-32.
- [3]李小珍,肖林,黄玲,等.混合梁斜拉桥钢-混结合段静力行为[J].哈尔滨工业大学学报,2013,45(6):75-82.
- [4]唐亮,吴文明,刘高,等.有格室-后承压板结合部构造的结构特性[J].工程力学,2010,27(11):234-243.
- [5]张凯,刘永健,琚明杰,等.无格室钢-混结合段构造形式与受力性能分析[J].公路交通科技,2016,33:73-79.