

轻型钢-混凝土过渡段构造设计与有限元分析

陶 海

(上海浦东建筑设计研究院有限公司, 上海市 200126)

摘 要: 为了增大中跨跨径,同时控制造价,很多桥梁都采用了混合梁作为主梁,即主跨采用钢梁,边跨为混凝土梁。这就导致两种材料相连处必然存在钢-混凝土过渡段。在保证传力可靠的前提下尽量简化过渡段的构造和重量是追求的目标。结合某混合梁悬索桥工程,设计了一种轻型钢-混凝土过渡段构造,较传统过渡段重量轻、结构简单、便于施工。采用有限元对钢-混凝土过渡段进行三维非线性分析,验证了其传力的可靠性,可为其他类似的工程提供设计参考。

关键词: 混合梁;钢-混凝土过渡段;有限元;非线性分析;悬索桥

中图分类号: U442.5

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2025)10-0109-04

Structural Design and Finite Element Analysis of Lightweight Steel-Concrete Transition Section

TAO Hai

(Shanghai Pudong Architectural Design and Research Institute Co., Ltd., Shanghai 200126, China)

Abstract: In order to increase the mid-span span and control the costs, the composite beams are used as the girders for many bridges, that is, the main span is the steel girder and the side span is the concrete beam, which leads to the inevitable existence of a steel-concrete transition section at the junction of the two materials. The goal is to simplify the structure and weight of the transition section as much as possible under the premise of ensuring the reliable force transmission. Combined with a composite beam suspension bridge project, a lightweight steel-concrete transition section structure is designed, which is lighter in weight, simpler in structure and easier to construct than the traditional transition section. The three-dimensional nonlinear analysis of the steel-concrete transition section is carried out using finite element method to verify the reliability of its force transmission, which can provide design reference for other similar projects.

Keywords: composite beam; steel-concrete transition section; finite element; nonlinear analysis; suspension bridge

0 引 言

随着桥梁工程向着经济、高效方向发展,钢与混凝土的材料组合起来,各自发挥其优势的桥梁越来越多,比较常见的是钢与混凝土上下叠合起来的组合梁。

近年来,工程师把主梁沿纵向分为两种材料进行结合,叫做混合梁。一般主跨采用钢梁形式,边跨采用混凝土梁形式^[1],这种组合不但节省了用钢量,而且可以缩短边跨长度,具有很好的经济性,可以应用到斜拉桥、悬索桥及连续梁(刚构)桥上,具有广泛的适用性。

既然有两种材料,必然涉及钢-混凝土过渡段,传统钢-混凝土过渡段的设计一般由混凝土横梁,箱形钢横梁内填充混凝土以及钢梁刚度过渡段组成。这种设计虽然传力很安全可靠,但混凝土实心段体量很大,导致局部出现较大集中力,不利于整体纵向受力,而且材料用量也大,不十分经济。

本工程设计的一种轻型钢-混凝土过渡段,取消了钢横梁内填充的实心混凝土,采用部分开口钢梁深入混凝土梁的横梁范围,设剪力钉和PBL剪力键,并在受拉缘设置预应力钢束。这种构造既减轻了重量,有利于整体受力,又保证了传力可靠,具有较好的经济效益。

1 工程概况

文章依托的工程为某双塔双索面自锚式悬索

收稿日期: 2025-06-24

作者简介: 陶海(1976—),男,博士,高级工程师,从事桥梁设计工作。

桥^[2],跨径布置为58 m+142 m+58 m=258 m,全宽15 m,标准断面为双边箱钢梁形式,梁高2.0 m。为了分散和传递强大的主缆锚固力,主梁边跨端部主缆锚固段采用全断面混凝土箱梁结构,梁高由2 m渐变到3.5 m。钢-混凝土过渡段设在边跨散索套与第一根吊索之间,如图1所示。

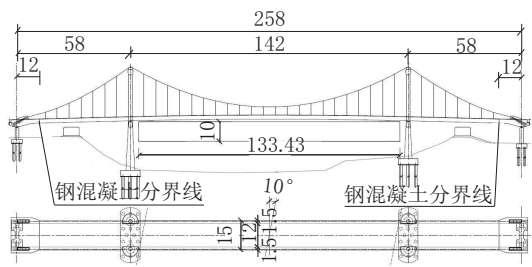


图1 桥梁总体布置图(单位:m)

2 钢-混凝土过渡段构造

传统钢-混凝土过渡段一般有4种基本受力形式:全断面承压型、部分断面承压型、全断面承压传剪型、部分断面承压传剪型^[3]。对于主梁来说,承压传剪型用的最多,一般由混凝土横梁、钢混凝土结合段、钢梁刚度过渡段三部分组成。钢混凝土结合段一般构造为钢箱内设置剪力键并灌注填芯混凝土,或者在顶底腹板设置600~1 000 mm左右高度的钢格室^[4-5],格室内壁布置剪力键,灌注填芯混凝土。

该工程采用的轻型钢-混凝土过渡段由钢混凝土结合段和钢梁刚度过渡段两部分组成,其中钢混凝土结合段由混凝土横梁与开口钢箱梁设剪力键组成,为全断面承压传剪型。这种轻型钢-混凝土过渡段取消了灌注填芯混凝土段,大大减少了混凝土用量,进而减轻了过渡段的自重,有利于结构总体受力,并具有一定经济性。而且相对于钢格室的复杂构造,具有构造简单、焊接空间大、便于施工的优势。

钢-混凝土过渡段梁高2 m,总长3.5 m,传剪过渡段长度2 m,在上、下缘纵桥向设置开孔板PBL剪力键^[6]及剪力钉传递剪力。钢梁的刚度过渡段为1.5 m长度箱形钢横梁,设置变高纵向加劲肋进行刚度过渡,内部不灌注混凝土。钢混凝土交界面设置承压钢板,承压板上混凝土梁侧布置剪力钉传递竖向剪力,钢梁侧采用格子形加劲肋加强刚度。根据过渡段内力情况,在受拉侧设置预应力钢束。本项目过渡段底板受拉,因此在过渡段的底板设置了预应力钢束,具体如图2、图3所示。

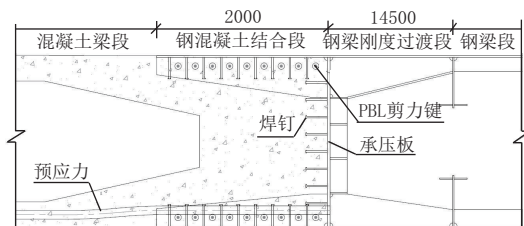


图2 轻型钢-混凝土过渡段纵剖面图(单位:mm)



图3 轻型钢-混凝土过渡段断面图(单位:mm)

3 三维有限元分析

3.1 模型的建立

采用通用非线性有限元软件ABAQUS进行建模分析^[7]。建模范围纵向包括全部主缆锚固区混凝土梁、钢-混凝土过渡段和钢梁段(共计四个钢横隔板间距),横桥向结构与荷载均关于桥梁中心线对称,故仅建立半桥宽模型,如图4所示。其中X向为顺桥向,Z向为横桥向。

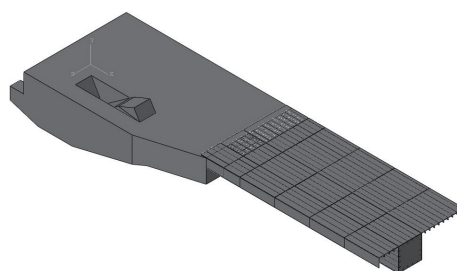


图4 计算模型简图

钢-混凝土过渡段上翼缘、下翼缘、腹板、竖向加劲肋、腹板和翼缘上的开孔加劲板均用三维实体单元模拟。忽略开孔及钢筋,以及焊钉构造,将PBL剪力键和焊钉用三维弹簧单元代替。

该三维弹簧单元由两个节点组成,每个节点有的三个方向自由度。为了避免节点传力的应力集中,在节点处建立了两个薄板单元,与节点采用刚性连接。将薄板分别埋入钢和混凝土中传力,以避免应力集中。

焊钉的剪切刚度根据蔺钊飞^[8]的研究成果,拟合的刚度计算公式:

$$k_s = 0.32d_s E_s^{0.25} E_c^{0.75}$$

得到该工程中焊钉连接件的抗剪刚度340 kN/mm。同时结合相关试验,给出了焊钉抗拉刚度建议值200 kN/mm。

开孔板抗剪刚度采用郑双杰^[9]的理论分析和模

型试验成果, 给出开孔板单孔抗剪刚度计算式:

$$k_s = \alpha_c \alpha_h (0.27 + 0.14 n_E n_d^2) E_c d$$

由上式可得到本工程中开孔板单孔抗剪承载力约为 613 kN/mm。

预应力钢束采用线单元建模, 然后将其嵌入到混凝土实体中。为避免应力集中, 预应力筋在端部的锚固模拟与开孔板弹簧元相同。

3.2 边界和荷载

(1) 约束和荷载

在横桥向沿桥中心线的对称面中采用对称约束, 在钢梁端部的纵向面上施加固定约束。

提取杆系全桥模型的基本组合最不利工况(考虑恒载、活载、体系温度、梯度温度、风荷载)下的相关内力: 边墩支座反力、主缆锚固面法向压力、散索套法向压力、吊索力均通过面荷载方式施加到模型中。由于梯度温度在局部模型中影响较小, 故模型本身仅考虑体系温度和活载。

预应力加载采用降温法模拟, 根据 $\sigma = \Delta T \alpha E$ 进行计算(α 为膨胀系数, E 为预应力筋弹模)。

(2) 材料本构

混凝土本构采用损伤塑性本构模型, 按照规范《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010) 附录 C^[10] 中的规定。忽略钢筋在混凝土梁的具体分布, 根据弹模比将钢筋的影响换算为混凝土弹性模量的增强系数 1.07。

钢材本构采用两段式曲线, 即达到屈服应力以前均服从胡克定律, 达到屈服应力后进入平台段。设普通钢筋屈服应力 400 MPa, 预应力筋屈服应力 1 860 MPa。

(3) 钢混凝土界面接触行为

钢与混凝土之间的界面传力问题模拟为垂直交界面方向的接触问题和切线方向的滑移问题^[11-13]。滑移问题模拟采用库伦摩擦模型, 摩擦系数取 0.4。

(4) 单元网格划分

采用自由划分技术划分网格, 混凝土和钢结构均采用二阶 10 节点四面体单元 C3D10M, 混凝土网格大小 0.2 m, 钢结构网格大小 0.08, 模型共计 30 万个单元。经过加密网格分析试算, 钢梁和混凝土典型应力变化在 5% 左右, 网格精度满足分析要求。

3.3 结果分析

(1) 钢-混凝土过渡段传力路径分析

轻型钢-混凝土过渡段主要传力路径^[14-15]为: 混凝土梁段→钢混凝土结合段→承压板→钢梁刚度过

渡段→钢梁段, 如图 5 所示。

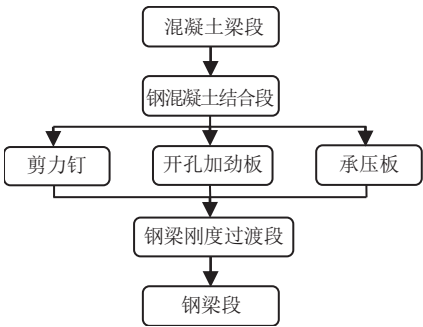


图 5 钢-混凝土过渡段传力图

(2) 连接件受力状态

焊钉的最大剪力发生在沿着桥梁纵向为 52 kN, 对应最大纵向滑移为 52 / 340=0.15 mm, 发生在靠近顶底板处。

焊钉的最大竖向拉拔力在沿着桥梁纵向为 8 kN, 发生在靠近顶底板和横隔板处。

(3) 混凝土梁应力

由图 6、图 7 可见, 混凝土最大主拉应力发生在预应力锚固截面处, 局部点拉应力超过 4 MPa, 这是锚头采用小圆片模拟以及耦合到混凝土单元中导致的局部点应力集中现象, 大部分区域的主拉应力均小于 1 MPa。最大主压应力发生在混凝土梁截面高度变小处以及混凝土梁端部, 均小于 22 MPa。



图 6 混凝土梁顶部主拉应力

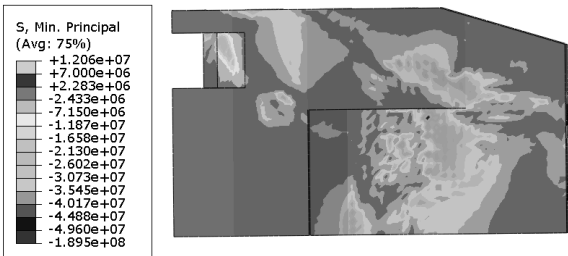


图 7 混凝土梁底部主压应力

(4) 钢-混凝土过渡段应力

图 8 展示了钢-混凝土过渡段顶部开孔板连接件顺桥向应力分布, 可见, 从混凝土梁方向向钢梁方向, 开孔板由受拉向受压转换。这一方面说明了混凝土顶面应力通过剪力连接件逐步向钢结构发生了转移, 又说明了靠近横隔板处预应力压力对钢材受

力影响较为显著。

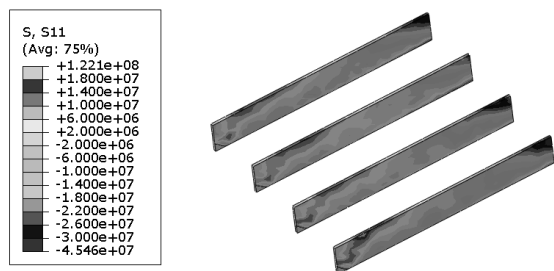


图8 钢-混凝土过渡段开孔板应力分布

由图9可见,钢-混凝土过渡段顶板和底板钢梁 MISES 应力,(除去局部应力集中)顶板最大应力在 180 MPa 以下,底板最大应力在 230 MPa 以下,均满足要求。

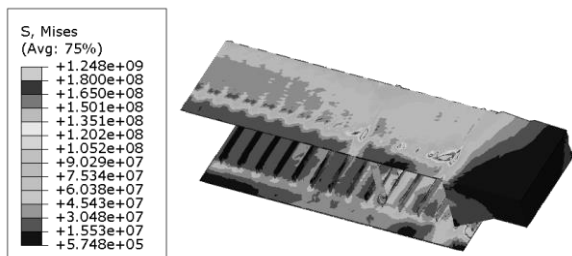


图9 钢-混凝土过渡段钢梁 MISES 应力

图10展示了钢-混凝土过渡段承压板 MISES 应力。可见,因为预应力筋在锚垫板处的局部压力作用,横隔板部分区域应力值过大,这是由于建模过程中用来模拟锚垫板的几何体选择过小导致。同样可见横隔板受力较小,顶板、底板和两侧腹板应力较大,起到了主要传力作用。

4 结 语

(1)设计了一种轻型钢-混凝土过渡段构造,具有自重轻、构造简单、便于施工,且能改善结构总体受力的优点,非常适合截面高度为 2 m 以内的小梁高钢-混凝土过渡情况。

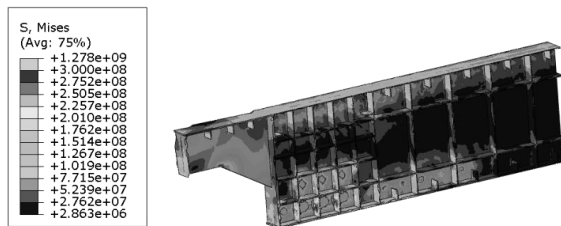


图10 钢-混凝土过渡段承压板 MISES 应力

(2)通过有限元仿真模拟计算,该轻型钢-混凝土过渡段构造满足受力要求,传力安全可靠。

参考文献:

- [1] 刘钱,邓昭伟,王亚飞,等. 瓯江大桥混合梁刚构桥钢混结合部构造[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2013, 9(11): 323-325.
- [2] 陶海. 裕民桥设计与施工[J]. 上海公路, 2024(4): 41-45.
- [3] JTG/T D64-01—2015, 公路钢混组合桥梁设计与施工规范[S].
- [4] 刘安双,刘雪山,代彤,等. 重庆石板坡长江大桥复线桥钢-混凝土接头设计[J]. 桥梁建设, 2007(2): 35-38.
- [5] 刘明虎,徐国平,刘峰. 鄂东大桥混合梁钢-混凝土结合部研究与设计[J]. 公路交通科技, 2010, 27(12): 78-85.
- [6] 蒲怀仁. 佛山平胜大桥钢混结合段设计[J]. 公路工程, 2011, 36(3): 90-94.
- [7] 周宗尧,唐细彪. 混合梁悬索桥钢混结合段局部应力分析[J]. 世界桥梁, 2013, 41(3): 57-61.
- [8] 蔺钊飞. 组合梁桥钢-混凝土结合部设计方法研究[D]. 上海: 同济大学, 2016.
- [9] 郑双杰. 开孔板连接件计算模型与设计方法研究[D]. 上海: 同济大学, 2016.
- [10] GB 50010—2010, 混凝土结构设计规范[S].
- [11] 张光辉,陈聪,刘玉擎. 混合梁结合部格室-承压板协同作用机理[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2017, 45(5): 658-663.
- [12] 何伟兵,刘玉擎,汪蕊蕊. 九江长江公路大桥混合梁结合段构造分析[J]. 桥梁建设, 2012, 42(1): 30-35.
- [13] 徐宙元. 带开孔钢板剪力连接件的钢-混凝土组合桥面板试验研究与理论分析[D]. 成都: 西南交通大学, 2013.
- [14] 秦凤江,周绪红,梁博文,等. 大跨度自锚式悬索桥主梁钢-混凝土结合段模型试验[J]. 中国公路学报, 2018, 31(9): 52-64.
- [15] 康福,张茜,朱尧于,等. 钢格室长度对斜拉桥钢-混凝土结合段传力机理影响的研究[J]. 公路, 2025, 70(5): 124-129.

《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴,为您提供平台,携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

官方网址: <http://www.csdqyfh.com> 电话: 021-55008850 联系邮箱: roadbridgeflood@163.com

