

斜拉桥桥面板横向分析计算模型方法比较

刘宇¹, 凌壮志², 王溥哲², 孙华东³, 刘勇军³, 陈经纬¹

(1. 中铁上海设计集团集团有限公司, 上海市 200070; 2. 杭州地方铁路开发有限公司, 浙江 杭州 310007;

3. 中铁二十四局集团有限公司, 上海市 200071)

摘要: 为比较斜拉桥桥面板横向分析中不同计算模型的差异,以嘉兴市快速路三期二阶段上跨沪昆铁路立交工程的独塔中央索面混凝土斜拉桥为工程背景,分别建立横向杆系模型、空间网格模型和实体模型,对比恒载、车辆荷载、预应力钢束作用以及三者组合共4种荷载工况下的桥面板横向应力分布。结果表明:在前3种荷载工况下,3种模型的桥面板应力正负和变化规律基本一致;与另外2种模型相比,横向杆系模型在恒载下的桥面板上下缘拉应力偏小,在车辆荷载下的应力极值偏大而在预应力钢束作用下的压应力偏小;在3种荷载组合的第4种工况下,横向杆系模型与实体模型的最大应力差为4.6 MPa,明显大于空间网格模型与实体模型的最大应力差1.7 MPa。横向杆系模型的应力结果相比另外2种模型偏保守,空间网格模型能够考虑箱梁一定的空间效应,与实体模型的应力差较小。

关键词: 独塔斜拉桥; 中央索面; 混凝土主梁; 桥面板; 横向分析; 有限元分析; 空间网格模型

中图分类号: U448.27; TU997

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2026)05-0192-05

Comparison of Calculation Models and Methods for Transverse Analysis of Cable-stayed Bridge Decks

LIU Yu¹, LING Zhuangzhi², WANG Bozhe², SUN Huadong³, LIU Yongjun³, CHEN Jingwei¹

(1. China Railway Shanghai Design Institute Group Corporation Limited, Shanghai 200070, China; 2. Hangzhou Local Railway Development, Hangzhou 310007, China; 3. China Railway 24th Bureau Group, Shanghai 200071, China)

Abstract: To compare the differences among various calculation models in the transverse analysis of cable-stayed bridge decks, taking the single-pylon central-plane concrete cable-stayed bridge of the Jiaying Expressway Phase III Stage II Overpass crossing the Shanghai-Kunming Railway as the engineering background, a transverse bar system model, a spatial grid model and a solid model are established to compare the transverse stress distributions of the bridge decks under four loading conditions such as constant load, vehicle load, prestressed steel strand action, and their combinations. The results show that under the first three load cases, the positive and negative stresses and variation trends of the bridge deck in the three models are generally consistent. Compared with the other two models, the tensile stress at the upper and lower edges of the bridge deck of the transverse bar system model under the constant load is relatively small. The stress extreme value under vehicle load is relatively large, while the compressive stress under the action of prestressed steel strands is relatively small. Under the fourth condition of the three load combinations, the maximum stress difference between the transverse bar system model and the solid model is 4.6 MPa, significantly greater than the 1.7 MPa difference between the spatial grid model and the solid model. The stress results of the transverse bar system model are relatively conservative compared with the other two models. The spatial grid model can consider a certain spatial effects of the box beam, and the stress difference from the solid model is relatively small.

Keywords: single-pylon cable-stayed bridge; central-plane; concrete girder; bridge deck; transverse analysis; finite element analysis; spatial grid model

0 引言

随着桥梁跨度的逐渐增大,桥梁的横向宽度也

随之提高。斜拉桥具有较大的跨越能力^[1],对于主梁采用混凝土箱梁的斜拉桥,宽箱截面的空间性能与横向受力较为复杂。因而,对于宽箱截面的混凝土梁斜拉桥,桥面板横向分析的准确性对于桥梁结构的安全性具有重要意义。

实际工程中常建立横向杆系模型进行斜拉桥的横向分析^[2-6]。该模型建模简单但难以模拟主梁受

收稿日期: 2025-09-30

基金项目: 中国铁路上海局集团有限公司科研计划项目(2024185)

作者简介: 刘宇(1997—),男,硕士,工程师,从事桥梁设计工作。

力的真实情况,若建立实体模型进行验算,则建模复杂,计算量大,输出的应力结果不能直接用于现行规范的配筋设计。《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG 3362—2018)提出了3种箱梁的精细化分析方法,用以考虑宽箱的空间效应,平衡计算精度和效率。基于精细化分析的空间网格模型,可对目前箱梁常见的开裂病害进行分析和针对性加固^[7-8],且空间网格模型能够反映箱梁所有需要关注的验算应力^[9],在波形钢腹板箱梁桥与钢-混凝土组合箱梁桥分析中也有较好的适用性^[10-13]。但针对斜拉桥的空间网格模型分析,目前研究不多。

本文以嘉兴市快速路三期二阶段上跨沪昆铁路立交工程的独塔中央索面混凝土斜拉桥为工程背景,分别建立了主梁的横向杆系模型、空间网格模型和实体模型,并对比了这3种模型在恒载、车辆荷载、预应力钢束作用以及3种荷载组合下的桥面板应力分布及其差异,以验证空间网格模型进行桥面板横向分析的可行性,为独塔中央索面混凝土斜拉桥的设计提供参考。

1 工程概况

斜拉桥采用塔、梁、墩固结体系,跨度为140 m+140 m,桥宽29.4 m;单侧跨布置20对斜拉索。桥型立面布置图见图1。

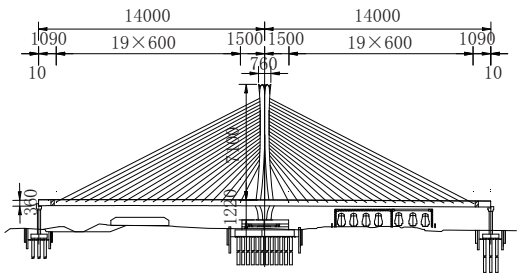


图1 桥型立面布置图(单位:cm)

主梁采用混凝土箱梁,为单箱5室等高截面,梁高3.6 m(见图2)。箱梁沿纵向在拉索处设有横梁,横梁间距6 m,厚度50 cm,拉索索梁锚固横向间距2.4 m。

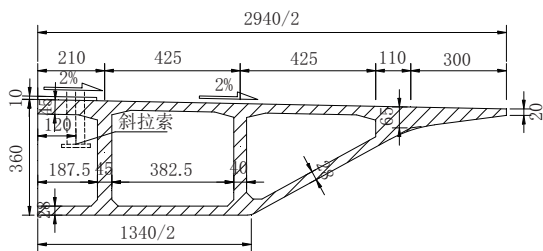


图2 主梁1/2标准截面示意图(单位:cm)

主梁标准断面的中箱顶板厚度55 cm,其余箱室顶板厚度28 cm,底板厚度28 cm;中箱直腹板厚度

45 cm,边箱直腹板厚度40 cm,斜腹板厚度28 cm。悬臂长3 m,端部厚度20 cm,根部厚度65 cm。

2 桥面板横向分析模型

2.1 计算模型

采用MIDAS Civil软件建立横向杆系模型。沿主梁纵向取1 m长度所建立的模型见图3。



图3 横向杆系模型示意图

在腹板下方施加竖向弹性支承,其中为避免横向杆系模型的悬臂与包含斜腹板的边箱形成大悬臂,悬臂根部处也设置支撑。

所有腹板竖向支撑刚度之和 K 为:

$$K = F/\Delta \tag{1}$$

式中: F 为在总体模型主梁验算截面处施加的力; Δ 为该处的竖向位移。

由式(1)可求得主梁最小竖向刚度处的 K 值为 1.0×10^5 kN/m。

基于各腹板的 $EA \sin(\alpha)$ 进行竖向刚度分配。其中: E 为混凝土弹性模量; A 为横向杆系模型里腹板沿高度方向的截面面积; α 为腹板与桥面板的夹角。由此可得:单个中腹板、边腹板和斜腹板的竖向刚度分别为22 842、20 305、6 853 kN/m。

采用MIDAS Civil软件建立空间网格模型。

空间网格模型通过将桥梁结构的顶板、底板和腹板离散为板元,并以十字交叉的纵横梁刚度等效代替板元的刚度^[14],可达到精细化分析的效果。由于进行桥面板横向分析时,纵向预应力的影响不大,因而,为简化计算,模型仅考虑桥面板和拉索横梁中的横向预应力,其中桥面板横向预应力施加在等代桥面板纵横梁的横向单元中,拉索横梁中的横向预应力施加在拉索横梁单元中(见图4)。

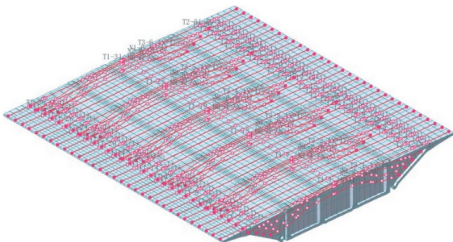


图4 空间网格模型与横向预应力示意图

实体有限元模型采用MIDAS FEA软件建立。混凝土梁按六面体单元进行网格划分,预应力钢束采用植入式桁架单元模拟,预应力布置与空间网格模

型一致(见图5)。

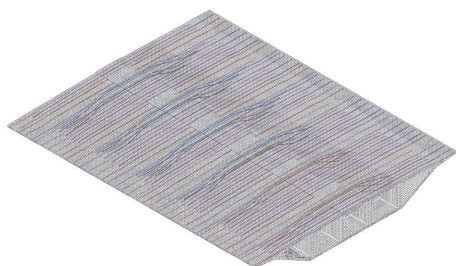


图5 实体模型与横向预应力示意图

为尽可能减小边界约束条件对验算区域受力的影响,空间网格模型和实体模型均选取5个标准节段的主梁进行计算分析,单个节段纵桥向长6 m。边界条件设置为主梁两端固结,并在拉索位置施加对应的索力。

2.2 预应力钢束布置

主梁每延米桥面板布置规格为 $4\phi \times 15.2$ mm的2根钢束(T1、T2),间距0.5 m。T1、T2钢束采用单端张拉,一侧伸入悬臂,另一侧在悬臂端部截断,交替间隔布置张拉端。拉索横梁钢束规格为 $15\phi \times 15.2$ mm,采用两端张拉。

桥面板、拉索横梁钢束示意图见图6。

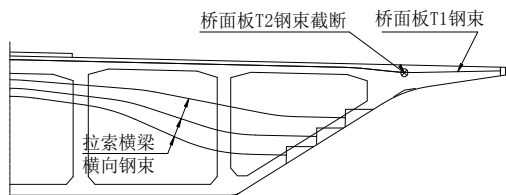


图6 桥面板、拉索横梁钢束示意图

2.3 荷载工况

选取恒载、车辆荷载、预应力钢束作用及三者组合共4个荷载工况,分别对比不同模型桥面板的应力分布。其中,车辆荷载等级为城-A级,横向杆系模型考虑车轮的扩散宽度。

3 计算结果对比分析

选取1/2桥面板进行应力对比。其中将应力为正设为拉应力,应力为负设为压应力。

3.1 恒载作用下桥面板应力对比

恒载作用下,横向杆系模型、空间网格模型和实体模型的1/2桥面板上下缘正应力图见图7、图8。

由图7、图8可知,在恒载作用下,3种模型的桥面板上下缘应力正负和变化规律基本一致;同时,桥面板的上下缘应力分布呈相反的变化趋势,这是由于在腹板的支承作用下,桥面板的受力模式与多跨连续梁相似,而非轴向受力模式。

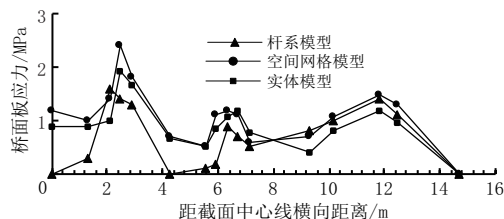


图7 恒载作用下的1/2桥面板上缘正应力图

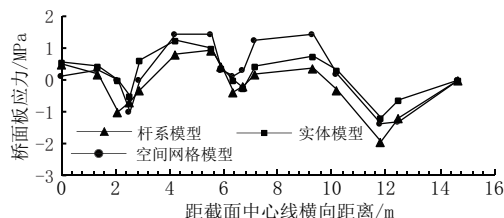


图8 恒载作用下的1/2桥面板下缘正应力图

由于中央索面的斜拉桥在恒载下,主梁横向受力呈大悬臂状态,导致桥面板横向存在一定的拉应力,因而,空间网格模型和实体模型的桥面板在两腹板间的跨中截面上下缘应力均为拉应力;横向杆系模型的桥面板上下缘拉应力则小于另外2种模型,原因是横向杆系模型无法考虑附近拉索提供的竖向支撑作用。

空间网格模型与实体模型的桥面板上下缘最大应力差约0.7 MPa;横向杆系模型与实体模型的桥面板上下缘最大应力差约1.0 MPa。

3.2 车辆荷载作用下桥面板应力对比

由于用实体模型计算车辆荷载横向应力包络图较为困难,因而,分别对比桥面板横向单侧布置3车道时,车辆沿中侧路缘带布置、居中布置和沿端侧路缘带布置这3种布置工况下的应力。车辆荷载的3种横向布置工况见图9;横向杆系模型、空间网格模型和实体模型的1/2桥面板上下缘正应力图见图10至图15。

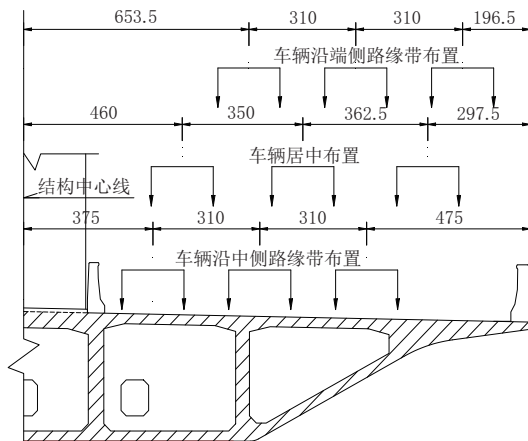


图9 车辆荷载的3种横向布置工况(单位:cm)

由图9至图15可知,3种车辆荷载布置工况下,3种模型的桥面板上下缘应力正负和变化规律基本一

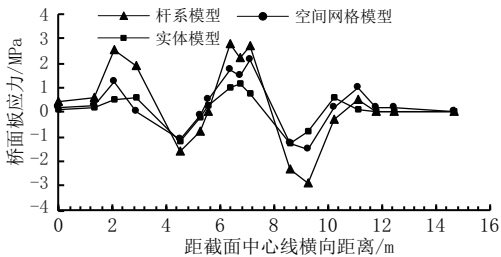


图 10 车辆荷载沿中侧路缘带布置工况下的 1/2 桥面板上缘正应力图

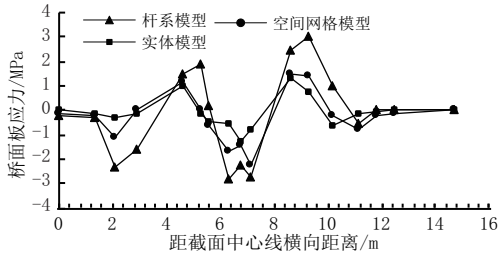


图 11 车辆荷载沿中侧路缘带布置工况下的 1/2 桥面板下缘正应力图

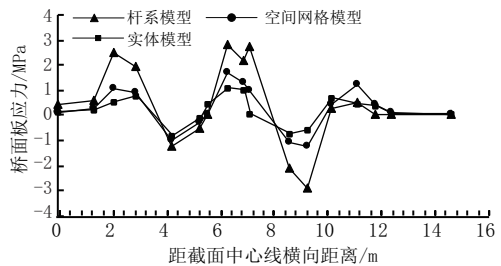


图 12 车辆荷载居中布置工况下的 1/2 桥面板上缘正应力图

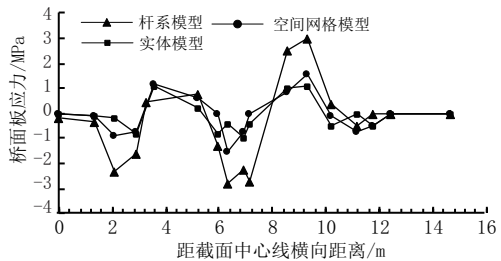


图 13 车辆荷载居中布置工况下的 1/2 桥面板下缘正应力图

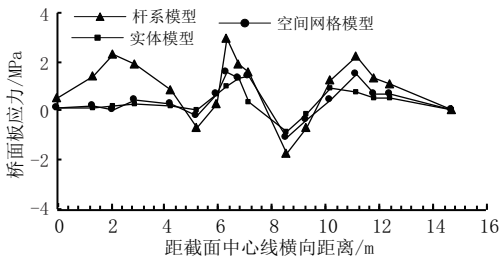


图 14 车辆荷载沿端侧路缘带布置工况下的 1/2 桥面板上缘正应力图

致,桥面板的上下缘应力分布和正负均呈相反的变化趋势。空间网格模型与实体模型的桥面板上下缘最大应力差约 1.2 MPa;横向杆系模型的桥面板上下缘拉、压应力极值明显大于另外 2 种模型,与实体模型的最大应力差约 2.4 MPa。原因可能是横向杆系模型无法考虑双向板效应,且车轮加载不如另外

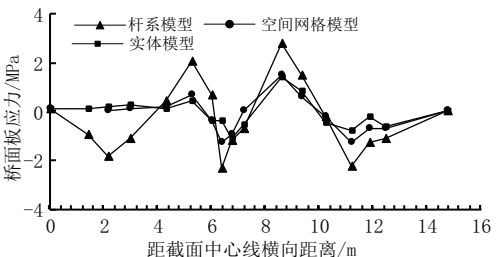


图 15 车辆荷载沿端侧路缘带布置工况下的 1/2 桥面板下缘正应力图

2 种模型扩散均匀。

3.3 预应力钢束作用下桥面板应力对比

预应力钢束作用下,横向杆系模型、空间网格模型和实体模型的 1/2 桥面板上下缘应力图见图 16、图 17。

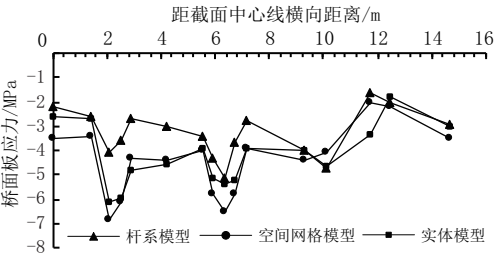


图 16 预应力钢束作用下 1/2 桥面板上缘正应力图

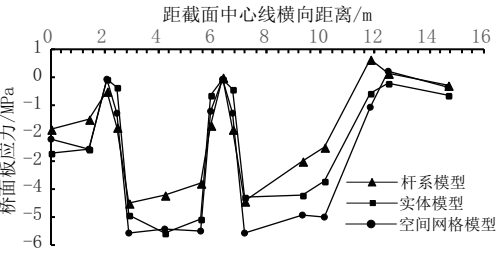


图 17 预应力钢束作用下 1/2 桥面板下缘正应力图

由图 16、图 17 可知,在横向预应力作用下,3 种模型的桥面板上下缘应力正负和变化规律基本一致。由于桥面板横向预应力靠近上缘布置,产生的偏压荷载使得桥面板在腹板处上缘压应力较大,而下缘几乎无压应力;桥面板在两腹板间的跨中截面由于钢束次内力的影响较大,下缘压应力大于上缘压应力。空间网格模型与实体模型的桥面板上下缘最大应力差约 1.1 MPa;横向杆系模型的桥面板上下缘压应力小于另外 2 种模型,与实体模型的应力差约 2.1 MPa。原因是横向杆系模型无法考虑附近桥面板的钢束及横梁钢束的影响。

3.4 荷载组合下桥面板应力对比

选取车辆沿居中布置工况,与恒载、预应力钢束作用进行荷载组合,可得横向杆系模型、空间网格模型和实体模型的 1/2 桥面板上下缘应力图,见图 18、图 19。

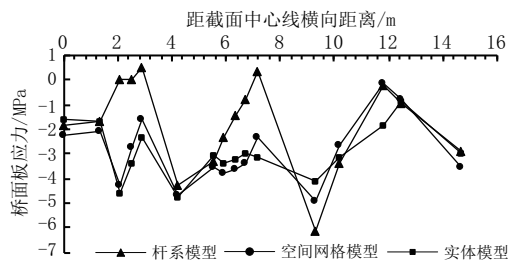


图18 荷载组合工况下1/2桥面板上缘正应力图

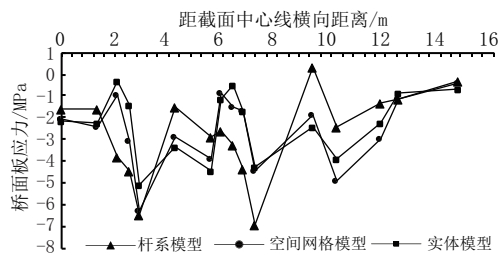


图19 荷载组合工况下1/2桥面板下缘正应力图

由图18、图19可知,荷载组合工况下,3种模型的桥面板上下缘应力正负和变化规律基本一致;空间网格模型与实体模型的桥面板上下缘均为压应力,横向杆系模型中,桥面板在中、边腹板处上缘与边箱跨中处下缘出现拉应力,最大约0.5 MPa。空间网格模型与实体模型的桥面板上下缘最大应力差约1.7 MPa;横向杆系模型的桥面板上下缘压应力极值明显大于另外2种模型,与实体模型的最大应力差约4.6 MPa。

4 结 语

(1)恒载、车辆荷载、横向预应力作用下,横向杆系模型、空间网格模型和实体模型的桥面板上下缘应力正负和分布规律基本一致。

(2)恒载作用下,横向杆系模型由于无法考虑附近拉索提供的竖向支撑作用,桥面板上下缘拉应力均小于另外2种模型,与实体模型的最大应力差约1.0 MPa;3种车辆荷载布置工况下,横向杆系模型由于无法考虑双向板效应,且车轮加载不如另外2种模型扩散均匀,使其桥面板的上下缘拉、压应力极值均明显大于另外2种模型,与实体模型的最大应力差约2.4 MPa;横向预应力作用下,横向杆系模型由于无法考虑附近桥面板钢束及横梁钢束的影响,桥面板上下缘压应力小于另外2种模型,与实体模型的最大应力差约2.1 MPa。3种荷载组合工况下,横向杆系模型的桥面板上下缘局部位置出现了最大值为0.5 MPa的拉应力,其应力极值明显大于另外2种模型,与实体模型的最大应力差约4.6 MPa。

(3)恒载作用下,空间网格模型与实体模型的最

大应力差约0.7 MPa;3种车辆荷载布置工况下,空间网格模型与实体模型的最大应力差约1.2 MPa;横向预应力作用下,空间网格模型与实体模型的最大应力差约1.1 MPa。3种荷载组合工况下,空间网格模型均为压应力,与实体模型的最大应力差约1.7 MPa。

(4)混凝土斜拉桥桥面板设计过程中,横向杆系模型的应力结果偏保守,主要体现在车辆荷载产生的拉应力极值偏大而预应力产生的压应力偏小,但其建模较简单,可快速求得内力进行设计。3种荷载组合工况下,空间网格模型与实体模型的最大应力差明显低于横向杆系模型与实体模型,表明空间网格模型能够考虑一定的空间效应,当需精细化分析或横向杆系模型计算不能满足规范要求时,采用空间网格模型进行分析与设计能够平衡计算效率和精度。实体模型能够反映箱梁所有的空间效应,计算精度最高,但计算量大,且输出结果为应力,不能直接用于现行规范的配筋设计,可用来验证另外2种模型的应力结果或分析腹板与桥面板交汇处等局部位置的三维应力状态。

参考文献:

- [1] 陈明宪.斜拉桥的发展与展望[J].中外公路,2006,26(4):76-86.
- [2] 马海英.预应力混凝土斜拉桥主梁横向应力分布研究[D].上海:同济大学,2007.
- [3] 陈能伟.单索面混凝土斜拉桥主梁横向应力分布研究[D].武汉:华中科技大学,2009.
- [4] 邵长胜,刘永锋,焦亚萌.京新高速上地斜拉桥横向计算分析[J].铁道勘察,2013,39(4):87-90.
- [5] 童汉元,王孝亮,陈今东,等.高低塔不对称斜拉桥横向受力数值分析[J].城市道桥与防洪,2023(3):110-112.
- [6] 王瑶.箱梁结构实用精细化分析模型研究[D].石家庄:石家庄铁道大学,2020.
- [7] 徐月火,田志强,尼颖升.基于空间网格模型的非对称连续梁病害分析[J].城市道桥与防洪,2018(9):130-134.
- [8] 马晔,尼颖升,徐栋,等.基于空间网格模型分析的体外预应力加固[J].吉林大学学报(工学版),2018,48(1):137-147.
- [9] 徐栋,徐方圆,赵瑜,等.箱梁结构完整验算应力和空间网格模型[J].土木工程学报,2014,47(5):46-55.
- [10] 徐栋,尼颖升,赵瑜.波形钢腹板梁桥空间网格分析方法[J].土木工程学报,2015,48(3):61-70.
- [11] Xu D, Ni Y, Zhao Y. Analysis of corrugated steel web beam bridges using spatial grid modelling[J].Steel & Composite Structures, 2015, 18(4): 853-871.
- [12] 尼颖升,孙启鑫,马晔,等.基于空间网格分析的多箱室波形钢腹板组合梁腹板剪力分配[J].吉林大学学报(工学版),2018,48(6):1735-1746.
- [13] 卫少阳,郭晓光.钢-混凝土组合箱梁桥空间网格计算模型研究[J].科技通报,2024,40(9):87-92;115.
- [14] 徐栋,赵瑜,刘超.混凝土桥梁结构实用精细化分析与配筋设计[M].北京:人民交通出版社,2018.