

多梁式工字钢-混凝土组合梁设计要点分析

李泽霖

[上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海市 200092]

摘要:以40 m跨径的多梁式工字钢-混凝土组合梁为研究对象,利用ANSYS通用有限元软件建立三维数值分析模型。分析焊钉的集束式布置与均布式布置、组合梁的滑移效应及跨间横梁的设置情况等条件对结构横向分布系数、剪力滞效应、桥面板横向弯曲及成桥过程稳定等方面的影响。总结并提出建议,以期为类似结构的设计提供参考。

关键词:钢-混凝土组合梁;工字钢;横向分布系数;剪力滞;桥面板横向弯曲;屈曲稳定

中图分类号: U442.5

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2023)01-0091-06

0 引言

随着交通基建行业的迅猛发展,《公路水路交通运输主要技术政策》及《交通运输部关于推进公路钢结构桥梁建设的指导意见》等相关政策的推动,工字钢-混凝土组合梁因其较强的跨越能力的特点,大量地应用于跨越中等河流及立交路口。

钢-混凝土组合结构桥梁在我国的应用实践表明,它兼有钢桥和混凝土桥的优点,具有显著的技术经济效益和社会效益,适合我国基本建设的国情,将成为桥梁结构体系的重要发展方向之一^[1],是实现标准化、工业化桥梁的理想结构形式。而桥梁装配化施工是实现桥梁工程工业化、产业化生产的核心。焊接工字钢梁因材料指标低,施工快速、简单,质量易控等优点切合桥梁工程的装配化理念,故研究工字钢-混凝土组合梁的受力性能、对比不同构造的影响有利于为后续的设计工作提供一定参考。

1 工程概况

现以40 m跨径的多梁式工字钢-混凝土组合梁为研究对象,结构总体布置如图1所示。单幅桥面宽度16.5 m, C55混凝土桥面板,桥面板厚度250 mm,混凝土桥面板与钢梁之间通过焊钉连接,焊钉采用22×200圆柱头焊钉,焊钉顺桥向分别采用集束式与均布式进行对比,焊钉布置形式如图2所示,焊钉顺桥向设置142排,每排4列,列间距125 mm。主纵梁为Q345工字钢梁,横向共布置4片,梁间距

4 125 mm。主纵梁所采用的工字梁上翼缘宽600 mm,板厚28 mm,下翼缘宽700 mm,板厚45 mm,钢梁梁高1 900 mm,腹板厚度20 mm。端部设端横梁,端横梁上翼缘宽1 060 mm,板厚28 mm,下翼缘宽300 mm,板厚20 mm,端横梁梁高1 500 mm,腹板厚度16 mm,端横梁上翼缘采用焊钉与混凝土桥面板连接。跨间纵向设置七组横向联系梁,横向联系间距5 m,采用小横梁形式,与桥面板间设置300 mm间隙,小横梁为工字形截面,上下翼缘板宽度300 mm,翼缘厚度15 mm,梁高700 mm,腹板厚度10 mm。

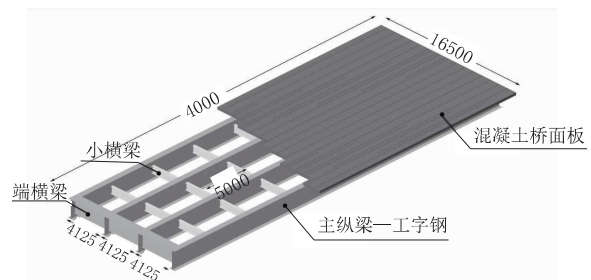


图1 多梁式工字钢-混凝土组合梁总体布置图示

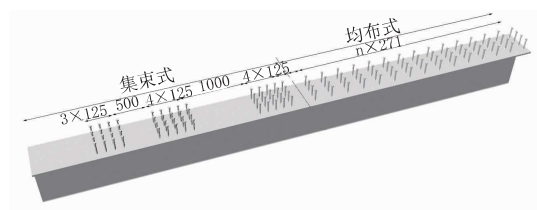


图2 焊钉布置示意图

2 数值模型

以通用有限元软件ANSYS为平台,将研究对象抽象为实体单元与板壳单元组合的三维有限元分析模型进行研究。为研究组合梁滑移效应及焊钉布置形式对结构的影响,共建立三种对比模型。其中,模型一混凝土桥面板采用SOLID65单元模拟,钢梁采用

收稿日期: 2022-03-16

作者简介: 李泽霖(1988—),男,硕士,工程师,从事桥梁设计与研究工作。

SHELL181 单元模拟,混凝土与钢梁间不考虑滑移,两种类型的单元在交界面处节点相互耦合;模型二混凝土桥面板与钢梁模拟同上,混凝土与钢梁间考虑滑移,分别以三个方向的 COMBIN14 弹簧单元为一组模拟焊钉的力学性能,其中焊钉的水平刚度为:

$$k_{ss} = 13.0d_{ss}\sqrt{E_c f_{ck}} \tag{1}$$

式中: d_{ss} 为焊钉直径; E_c 为混凝土弹性模量; f_{ck} 为混凝土抗压强度标准值^[2]。

焊钉的布置形式如前文所述的集束式布置。模型三在模型二的基础上,调整焊钉的布置形式如前文所述的均布式布置。在划分混凝土桥面单元时,为合理地反映其力学状态,将其在厚度方向上划分为 4 层单元^[3]。以模型二为例,其数值分析模型如图 3 所示,材料的力学性能指标如表 1 所列。

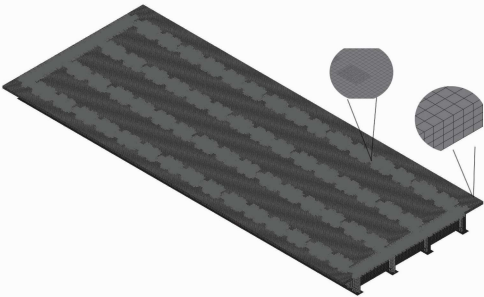


图 3 数值分析模型

表 1 材料力学性能表

材料	容重 / ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	弹性模量 /MPa	泊松比 ν	热膨胀系数 / ($1/^\circ\text{C}$)
混凝土 C55	2 800	3.55×10^4	0.2	1.0×10^{-5}
钢材 Q345	7 850	2.06×10^5	0.31	1.2×10^{-5}

3 横向分布系数

虽然近年随着计算机辅助设计能力的提升,工程项目中更多地开始采用空间结构分析,但由于横向分布的概念将结构空间问题转化为平面问题,理论概念清晰,有效地简化了结构计算,仍多用于结构匡算及成果校核。分析多梁式混凝土桥内力的常用的计算方法有杠杆法、刚接板(梁)法、G-M 法、偏心压力法及修正偏心压力法等^[4]。对于多梁式钢-混凝土组合梁,其横向分布特点既有与多梁式混凝土桥的相似之处,又由于因其横向联系的形式及焊钉的滑移影响而具有特殊性。

荷载横向分布影响线采用横向移动集中荷载逐梁加载,获取各梁位于跨中处的竖向位移,根据下式计算影响线竖标值。

$$\eta_{ij} = \frac{f_{ij}}{\sum_{i,j=1}^n f_{ij}} \tag{2}$$

式中: η_{ij} 代表荷载作用于 j 梁时对应 i 梁的影响线竖标; f_{ij} 代表移动荷载作用于 j 梁引起的 i 梁的竖向位移。

为便于对比不同条件下的各数值模型,对边梁、中梁分别绘制了在七组跨间横梁及无跨间横梁两种构造类型下的影响线,如图 4、图 5 所示。

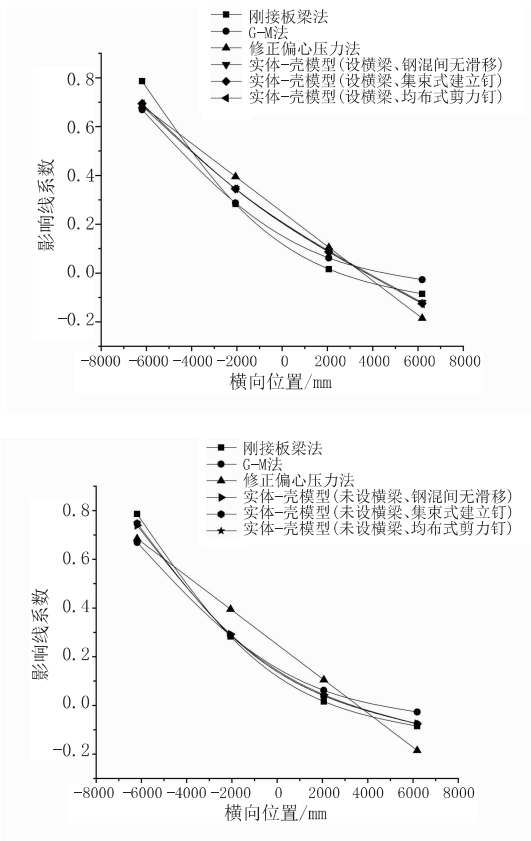


图 4 边梁影响线曲线图

由图 4、图 5 可知,常规剪力件布置条件下,组合梁的滑移效应对荷载的横向分布有一定的影响,但影响相对较小,对于采用横向分布的简化计算可以忽略;不同的焊钉布置形式,即集束式与均布式布置对荷载的横向分布影响较小;对于少横梁或无横梁的工字钢-混凝土组合梁其横向分布形式与刚接板(梁)法拟合得较好,随着跨间横梁的增加,其横向分布形式趋向于修正偏心压力法。

4 剪力滞效应分析

因初等梁理论的平截面假定条件,在采用梁模型计算截面应力时,同一纤维高度处的应力值相同。但由于剪力流作用的存在,往往腹板边缘处的翼板应力与梁间翼板的应力不同,当靠近腹板的翼板弯曲应力大于远离腹板的翼板的弯曲应力时,称为正剪力滞,反之为负剪力滞。工字钢-混凝土组合梁主纵梁间距相较装配式混凝土梁,主梁间距更大,其应

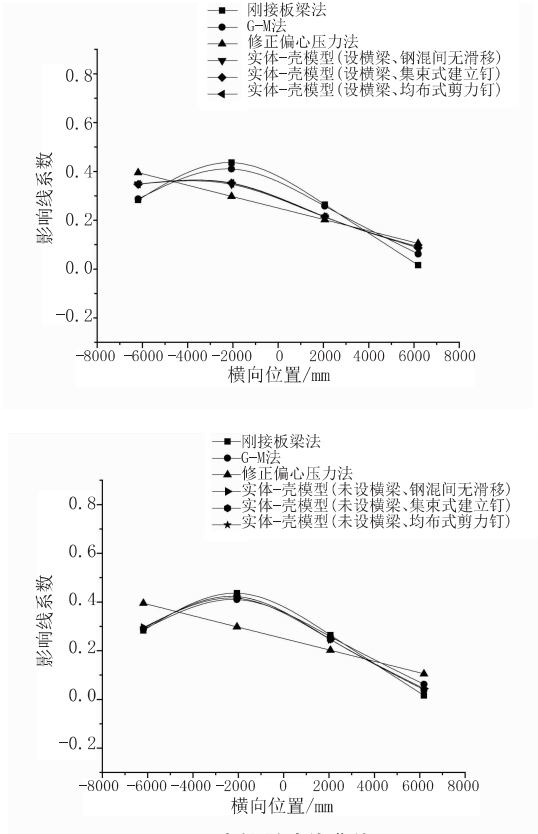


图 5 中梁影响线曲线图

力不均分布的情况将会更为突出。通常采用剪力滞系数 λ ^[5]来解析剪力滞效应的影响。

$$\lambda = \frac{\text{考虑剪力滞效应的翼板正应力}}{\text{初等梁理论的翼板正应力}}$$

为分析不同荷载类型产生的剪力滞效应,在前节所述的模型基础上,分别研究各梁位 200 kN/m 均布线荷载和各梁位跨中 70 kN 集中轮载两种工况下的剪力滞效应分布形式(见表 2、表 3 所列及图 6~图 8 所示)。

表 2 混凝土顶板上缘纵向应力表 单位:MPa

类型	工况一:均布线荷载	工况二:集中荷载
A		
B		
C		

注:A 模型为实体-壳模型(钢-混凝土间无滑移),B 模型为实体-壳模型(集束式焊钉),C 模型为实体-壳模型(均布式焊钉)。

表 3 混凝土顶板上缘剪力滞系数表

类型	工况一:均布线荷载			工况二:集中荷载		
	跨中	0.2L	0.075L	跨中	0.2L	0.075L
A	1.01	1.08	1.08	1.78	1.00	1.03
B	1.02	1.01	1.08	1.28	1.05	1.18
C	1.00	1.03	1.08	1.51	1.01	1.05

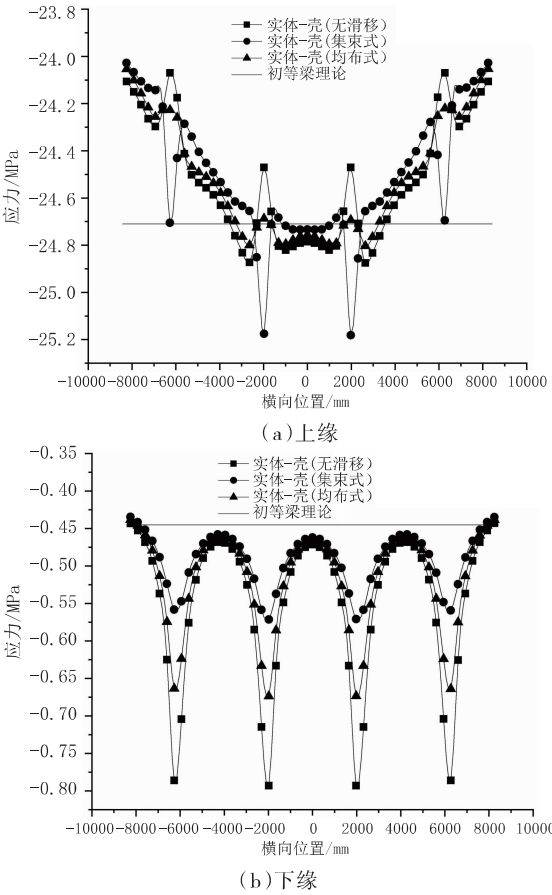


图 6 跨中处混凝土纵向应力曲线图(单位:MPa)

由表 2、表 3 及图 6~图 8 分析可知,在均布线荷载与集中荷载作用下结构存在剪力滞效应,对于均布线荷载剪力滞效应于梁端部表现明显,对于集中荷载剪力滞效应取决于荷载作用位置,近荷载作用处剪力滞效应明显。考虑常规工程焊钉的布置的数量及刚度,组合梁的滑移效应对剪力滞有微弱影响,可简化不计。焊钉布置形式对桥面板顺桥向正应力的整体分布趋势影响较小,但由于集束式焊钉相较于均布式焊钉顺桥向刚度局部突变,因而对局部剪力滞系数分布存在较大影响。

5 桥面板横向弯曲

对少横梁或小横梁的工字钢-混凝土组合梁,主纵梁范围内的混凝土桥面板顺桥向支撑跨径远大于 2.5 倍的横桥向支撑跨径,因此一般可按单向板设

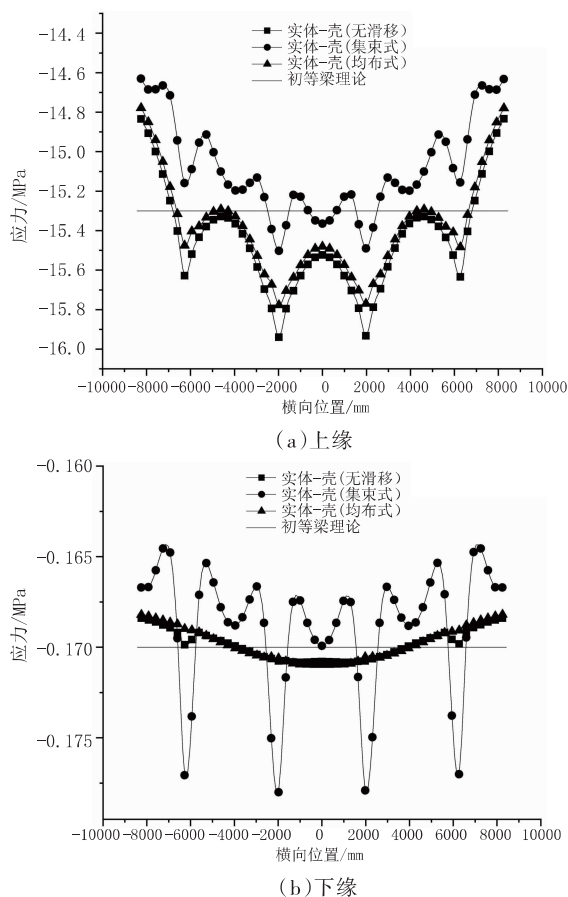


图7 ± 0.2L处混凝土纵向应力曲线图(单位:MPa)

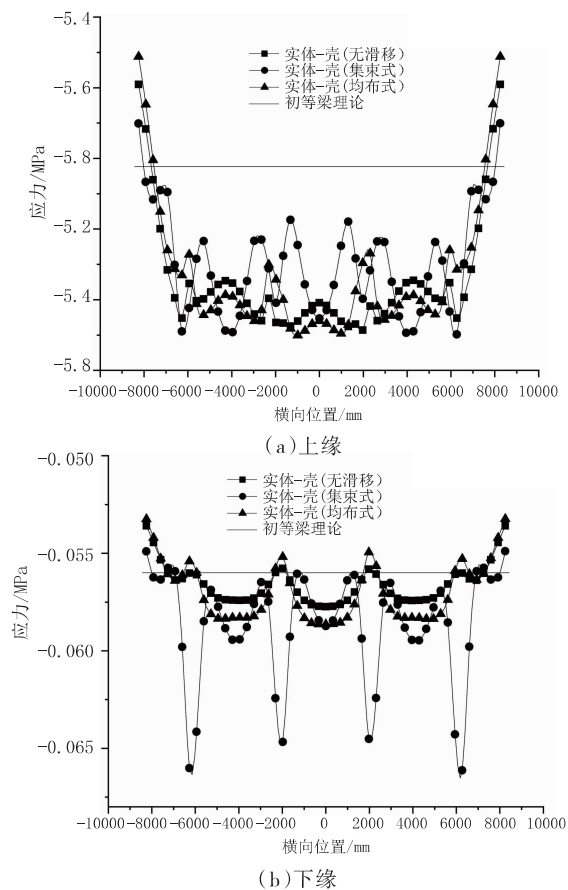


图8 ± 0.075L处混凝土纵向应力曲线图(单位:MPa)

计,对于混凝土板的端自由边,实际为三边支撑板,可按端边嵌固的悬臂板考虑。

为探究在轮载作用下横梁的设置情况及桥面焊钉布置形式对桥面板横向受力性能的影响,于跨中处及悬臂端0.8 m处对三组模型各加载70 kN的单车轮荷载,对照所用的横梁设置于加载点位平面投影下方。桥面板各工况下横向应力状态如图9~图11所示。验算截面处横向应力所积分内力见表4所列。

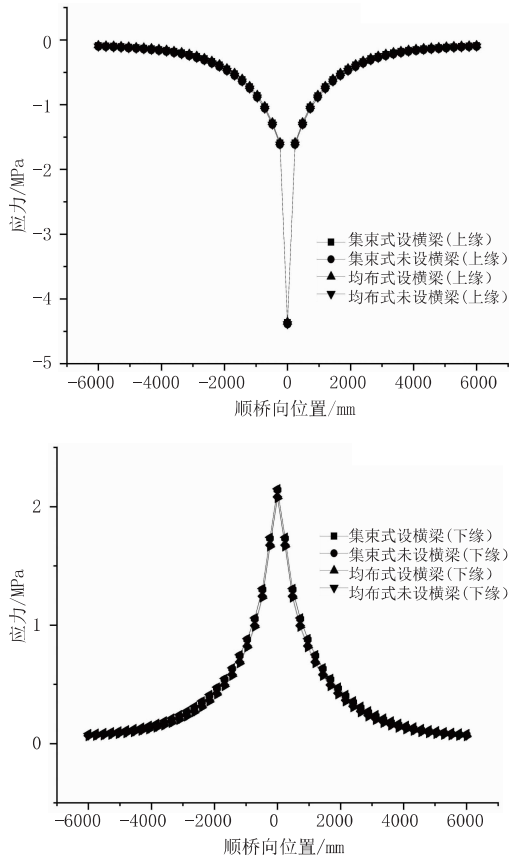


图9 跨中处单车轮荷载跨中位置曲线图(单位:MPa)

由图9~图11及表4分析可知,跨间横梁的设置对跨中桥面板上缘峰值应力影响较小,对其他位置处的峰值应力有较弱的影响。焊钉的布置形式对跨中处桥面板上下缘峰值应力无影响,对承托处桥面板,均布式焊钉的峰值应力绝对值高于集束式。跨间横梁的设置可减少跨中加载工况下桥面板跨中位置及承托位置的横向弯矩。桥面板悬臂端加载时,外承托处桥面板横向弯矩与《公预规》设计值一致;跨中加载时,内承托处桥面板横向弯矩小于《公预规》设计值,采用《公预规》验算偏安全,对于跨中桥面板横向弯矩大于《公预规》设计值,采用《公预规》验算存在风险。

6 成桥过程稳定性分析

稳定问题是钢结构不容忽视的设计要素,对于

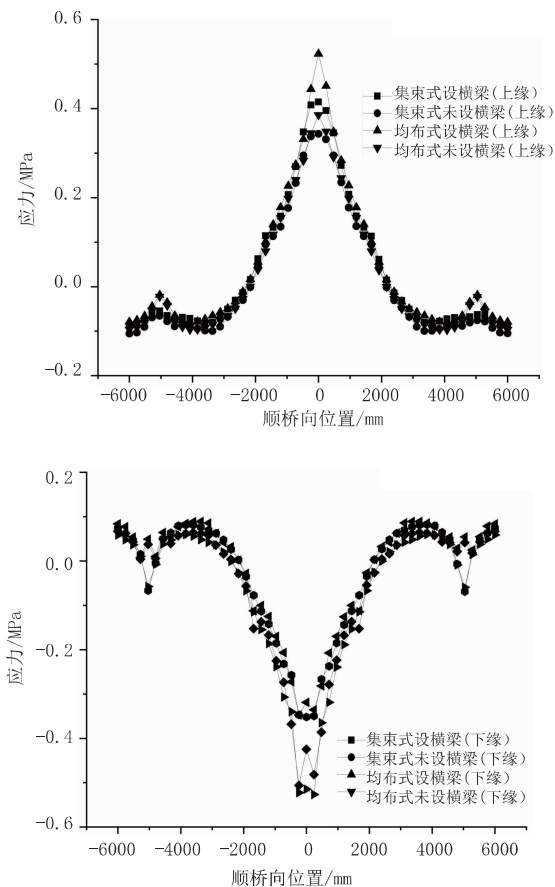


图 10 跨中处单车轮荷载承托位置曲线图(单位:MPa)

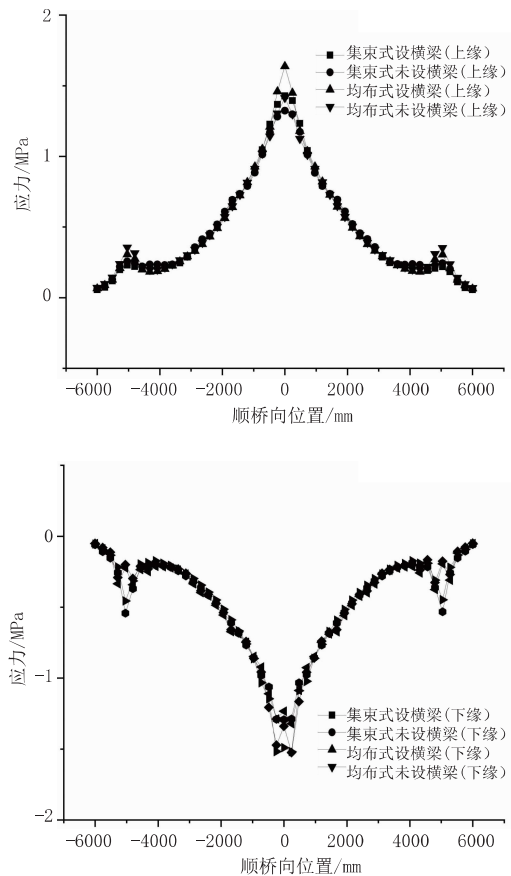


图 11 悬臂端 0.8 m 处单车轮荷载承托位置曲线图
(单位:MPa)

表 4 混凝土横向弯矩表			单位:kN·m	
类别	加载位置	验算位置	设置跨间横梁情况	
			设置	未设置
集群式焊钉	跨中加载	跨中	66.46	72.76
		承托	2.91	8.53
	悬臂加载	承托	75.25	75.25
均布式焊钉	跨中加载	跨中	64.37	70.82
		承托	0.83	6.67
	悬臂加载	承托	75.25	75.25
《公预规》 ^[6]	跨中加载	跨中	0.7 M ₀ = 45.94	
		承托	0.7 M ₀ = 45.94	
	悬臂加载	承托	75.25	

注:验算位置承托指横向最外排焊钉对应位置。

工字钢-混凝土组合梁,因成桥后混凝土翼缘板的约束作用一般不会发生钢梁整体失稳问题,但以钢梁为施工支架,架设或浇筑混凝土桥面板时,钢梁的整体稳定性能不能忽视,尤其对工字钢梁,其面外稳定性能更应予以重视。本节将桥面板自重等效为每片纵梁顶面的面荷载加载于前节所述的钢结构模型上翼缘。采用弹性稳定方法分析不同横向联系布置情况对钢梁稳定性的影响(见图 12~图 14 所示)。

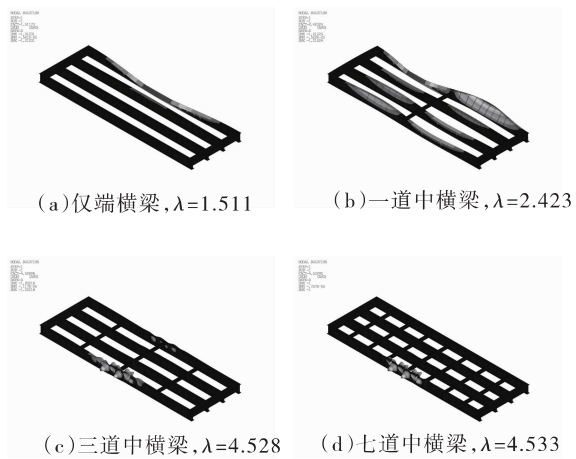


图 12 跨间横梁数量对稳定的影响图示

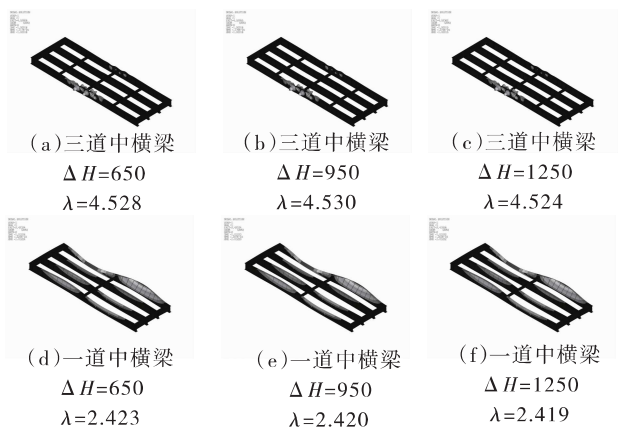


图 13 跨间横梁位置对稳定的影响图示



图 14 跨间横梁刚度对稳定的影响图示

由图 12 分析可知,增设横梁的道数,可有效地提高工字钢梁的稳定性能,钢梁的失稳模态由整体的面外弯扭失稳模态转变为腹板的局部失稳模态。对腹板局部失稳的结构,增设横梁不再提高稳定系数。在图 13 中,为横梁中心距主纵梁顶面距离,由分析可知,对腹板局部失稳的结构,横梁位于纵梁中心轴附近,稳定性能最好;对面外弯扭失稳的结构,横梁位于纵梁受压部,稳定性能最好,但横梁沿纵梁高度方向的位置对稳定系数的影响较小。在图 14 中,为横梁材料的弹性模量,由分析可知,横梁刚度较低时,不能形成较强的约束支撑,纵梁呈整体的面外弯扭失稳模态;横梁刚度提高 10 倍后,纵梁呈整体的面外弯扭失稳与腹板局部失稳混合模态;横梁刚度进一步提高 10 倍后,纵梁呈整体的面外弯扭失稳。综上,在设计过程中推荐采用通过成桥运营状态下的腹板局部稳定推算横梁布置数量的方式,从而可以有效地控制跨间横梁根数,对减少结构用钢量,提高经济效益,降低施工难度有积极作用。同时建议横梁刚度采用 10 倍的整体失稳与局部失稳混合模态的临界刚度,从而确保横梁构造对稳定性的有效作用。

7 结 语

本文对比了焊钉集束式与均布式两种布置形式、组合梁的滑移效应及跨间横梁设置情况等条件下,结构的横向分布系数、剪力滞效应、桥面板横向弯曲及成桥过程稳定等方面的影响,得出以下结论:

(1)常规剪力件布置条件下,组合梁的滑移效应对采用横向分布的简化计算可以忽略;焊钉布置形式的调整对横向分布系数影响较小;少横梁或无横梁的工字钢-混凝土组合梁其横向分布形式与刚接板(梁)法拟合得较好,随着跨间横梁的增加,横向分布形式逐步与修正偏心压力法更为接近。

(2)剪力滞效应随荷载的加载形式而变化。常规剪力件布置条件下,组合梁滑移效应对剪力滞的影响可简化不计。焊钉布置形式对桥面板顺桥向正应力的整体分布趋势影响较小,但由于集束式焊钉相较于均布式焊钉顺桥向刚度局部突变,因而对局部剪力滞系数分布存在较大影响。

(3)跨间小横梁的设置对桥面板的横向弯曲影响较小,不同焊钉布置形式对承托处横向弯曲应力峰值有影响。对于跨中加载或悬臂加载两种工况,承托处弯矩采用《公预规》的设计弯矩偏于安全;对于跨中加载的跨中弯矩,采用《公预规》的设计弯矩存在风险。

(4)增加跨间横梁的刚度及数量在一定范围内对提高混凝土桥面板架设过程中的工字钢梁整体稳定性有明显作用,由运营状态的腹板局部稳定控制横梁的设置数量是提高工字钢-混凝土组合梁经济效益,降低施工难度的合理方案。跨间横梁沿纵梁高度方向的位置对工字钢梁稳定性的影响较小。

参考文献:

- [1] 樊健生, 裴建国. 钢-混凝土组合桥梁研究及应用新进展[J]. 建筑钢结构进展, 2006, 8(5): 35-39.
- [2] JTG/T D64-01—2015, 公路钢混组合桥梁设计与施工规范[S].
- [3] 高诣民. 中小跨径梁桥装配化形式与组合梁桥承载力研究[D]. 西安: 长安大学, 2018.
- [4] 姚玲森. 桥梁工程[M]. 北京: 人民交通出版社, 2008.
- [5] 彭大文, 王忠. 连续弯箱梁剪力滞效应分析和实用算法研究[J]. 中国公路学报, 1998, 11(3): 41-49.
- [6] JTG 3362—2018, 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范[S].