

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2023.05.021

少横向联系钢板组合宽梁桥的荷载横向分布研究

李黎明¹,侯坤²,李积泉¹

(1.佛山市建盈发展有限公司,广东佛山 528313,2.湖南大学 土木工程学院,湖南长沙 410082)

摘要:目前,钢板组合宽梁桥中的横向联系布置数量趋于减少,为研究此种情形下宽桥的应力特别是荷载横向分布情况,并对比各荷载横向分布系数计算方法的适用性,以一座30 m简支钢板组合宽梁桥为背景,采用有限元法和国内外几种计算方法对其荷载横向分布系数进行计算,并选取桥面板厚度和钢横撑尺寸为参数进行对比分析。结果表明:中梁与边梁的荷载横向分布系数接近;相对于跨中不设横向联系,增设一道横向联系会略微增大边梁,减小中梁的荷载横向分布系数;桥面板厚度的影响很小;钢横撑的刚度并非越大越好,需根据实际情况选择;刚接梁法和AASHTO LRFD规范给出的计算方法较为可靠。

关键词:城市桥梁;荷载横向分布;数值计算;钢板组合梁;刚接梁法

中图分类号:U443.35

文献标志码:A

0 引言

钢板组合梁桥由多道平行的主梁构成,主梁通过横向联系和桥面板形成空间整体结构。在计算活载效应时,通常利用荷载横向分布系数来简化计算。荷载横向分布系数是将空间问题转化为平面问题来解决,主梁之间的相互作用关系得到简化^[1-4]。主梁之间的横向连接方式各有不同,为了使计算结果能够最大程度地接近实际情况,应选择不同的计算方法。中国传统的荷载横向分布系数计算方法有杠杆原理法、刚接板法和(修正)刚性横梁法等^[5-8];美国AASHTO LRFD规范给出的计算公式考虑了多重因素^[9-12]。城市钢板组合梁桥中,跨中不设或少设横向联系可以加快施工进度、减少现场施工、交通堵塞及环境污染,并且为了满足巨大的交通流量,通常宽度设计的较宽,对这种情况下钢板组合梁桥的荷载横向分布情况进行研究是十分必要的。

目前,已经有很多关于桥梁荷载横向分布的研究,一部分学者对传统荷载横向分布系数计算方法的适用性进行了研究分析,闫林君等^[13]采用多种荷载横向分布系数计算方法对装配式多主梁钢-混组

合梁桥的荷载横向分布系数进行了计算分析,并通过数值回归方法拟合给出了适合此类桥梁荷载横向分布系数的计算公式;唐小兵等^[14]对刚接板(梁)法荷载横向分布系数计算方法进行了研究分析,讨论了该方法存在的不足;Yousif等^[15]对AASHTO LRFD规范给出的荷载横向分布系数计算方法和有限元分析方法进行了对比,结果表明AASHTO LRFD规范过于保守。一部分学者根据实际需要,对传统荷载横向分布系数计算方法进行了修正,聂建国等^[16]计算了在用钢-混组合加宽后混凝土梁桥的横向分布系数,提出了修正的刚接梁法、刚性横梁法;项贻强等^[17]提出了考虑滑移的多梁式组合小箱梁桥荷载横向分布系数计算方法;李院军等^[18]通过引入主梁损伤折减系数,提出了考虑主梁损伤的装配式梁桥荷载横向分布系数的计算方法;魏志刚等^[19]基于刚接梁法的基本原理,提出了考虑混凝土桥面铺装影响的简支梁桥荷载横向分布系数计算方法;马驰等^[20]为了计算考虑剪切变形的多梁式改进型波形钢板组合小箱梁桥的荷载横向分布系数,提出了考虑自身剪切变形的偏心压力法、修正偏心压力法及刚接梁法等;陈强等^[21]基于比拟正交异性板法原理推导了适合大宽跨比桥梁荷载横向分布系数的

收稿日期:2023-07-10(修改稿)

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:51978257)

作者简介:李黎明,男,硕士,工程师.E-mail:277826266@qq.com

快速计算公式。还有学者对横梁对桥梁荷载横向分布的影响进行了研究,李立峰等^[22]研究分析了楣间和楣内横向联结系数对钢-混组合梁桥荷载横向分布的影响,给出了推荐的横向联结系布置形式,并评价了传统荷载横向分布计算方法的适用性;Chen等^[23]提出了一种新型加固混凝土T梁桥的横向联系方式,改善了T梁桥的荷载横向分布情况。

本文将利用Ansys有限元计算软件对少横向联系的钢板组合宽梁桥的荷载横向分布情况进行研究分析,并对各荷载横向分布系数计算方法的适用性进行分析讨论。

1 荷载横向分布系数的计算方法

1.1 中国计算方法

由于中国钢板组合梁桥发展较晚,规范中还没有明确钢板组合梁桥横向分布的规定,设计人员通常采用的是传统计算方法,如杠杆原理法、刚接板法和(修正)刚性横梁法等。而钢板组合梁桥与混凝土梁桥在构造上存在许多不同,横向联结系的种类很多,如大横梁和小横梁等,横向连接刚度难以界定,这些传统计算方法是否同样适用需要进一步研究。

1.2 国外计算方法

国外钢板组合梁桥发展较早,已经有许多关于钢板组合梁桥横向分布的研究。主流的计算方法有参数拟合法和“S-over”法,后续许多学者在这两种方法的基础上进行了修正,并应用在美国规范中。

1.2.1 参数拟合法

随着有限元方法等技术的发展,基于大量参数分析和试验验证的基础上,以主要影响参数拟合的计算方法开始陆续应用。

Zokaie^[24]以跨径、主梁间距、悬臂宽度和主梁刚度等分别拟合了内梁和外梁荷载横向分布系数 m_{GDF_m} 的计算公式如式(1)~(3)所示。

内梁多车道:

$$m_{\text{GDF}_m} = 0.15 + \left(\frac{S}{3}\right)^{0.6} \left(\frac{S}{L}\right)^{0.2} \left(\frac{K_g}{Lt^3}\right)^{0.1} \quad (1)$$

内梁单车道:

$$m_{\text{GDF}_m} = 0.1 + \left(\frac{S}{4}\right)^{0.4} \left(\frac{S}{L}\right)^{0.3} \left(\frac{K_g}{Lt^3}\right)^{0.1} \quad (2)$$

外梁多车道:

$$m_{\text{GDF}_e} = e \cdot m_{\text{GDF}_m} \quad (3)$$

$$e = \frac{7 + d_e}{9.1} \geq 1.0$$

外梁单车道:杠杆法。

式中: S 为主梁间距(ft); L 为跨径(ft); t 为桥面板厚度(ft); d_e 为悬臂宽度(ft); K_g 为主梁刚度(ft⁴), $K_g = n(I + Ae_g^2)$; n 为钢主梁与桥面板的弹模比; I 为主梁换算为钢材的截面惯性矩(ft⁴); A 为换算为钢材的截面面积(ft²); e_g 为桥面板中性轴至钢主梁中性轴之间的距离(ft)。

1.2.2 规范计算方法

AASHTO Standard规范中最早使用“S-over”的计算方法,认为横向分布系数与主梁间距线性相关,方法虽然简单,但横向分布系数计算结果过于保守。计算方法如下:

$$m_{\text{GDF}} = \frac{S}{D} \quad (4)$$

式中: m_{GDF} 为荷载横向分布系数; D 为与桥梁类型和几何特性等相关的常数,规范中根据车道数量分别取单车道为7.0,双车道为5.5; S 参数含义同前文。

后续,在AASHTO LRFD规范中详细规定了荷载横向分布系数的计算方法,如式(5)~(8)所示。此方法中限定主梁数目不小于4,当主梁数目为3时,可取下式计算结果和杠杆法中的较大值。

内梁多车道:

$$m_{\text{GDF}_m} = 0.075 + \left(\frac{S}{9.5}\right)^{0.6} \left(\frac{S}{L}\right)^{0.2} \left(\frac{K_g}{Lt^3}\right)^{0.1} \quad (5)$$

内梁单车道:

$$m_{\text{GDF}_m} = 0.06 + \left(\frac{S}{14}\right)^{0.4} \left(\frac{S}{L}\right)^{0.3} \left(\frac{K_g}{Lt^3}\right)^{0.1} \quad (6)$$

外梁多车道:

$$m_{\text{GDF}_e} = e \cdot m_{\text{GDF}_m} \quad (7)$$

$$e = \frac{7 + d_e}{9.1} \geq 1.0$$

外梁单车道:杠杆法。

外梁的横向分布系数还需与式(8)计算结果对比,选取较大值作为外梁最终荷载横向分布系数。

$$m_{\text{GDF}} = \frac{N_L}{N_g} + \frac{X_{\text{ert}} \sum N_L e_L}{\sum N_g a^2} \quad (8)$$

式中: X_{ert} 为外梁中心至桥轴线之间的距离(ft); a 为每片梁至桥梁轴线之间的距离(ft); e_L 为设计车辆或设计

车道至桥梁轴线之间的距离(ft); N_g 为主梁数量; N_L 为车道数量; S, L, t, K_g, d_e 参数含义同前文。

2 工程背景

某 30 m 简支桥面连续钢板组合梁桥,在两支点和跨中位置设置共 3 道横向联系,计算跨径 29.1 m,桥宽 18.5 m,由 8 片梁组成,梁高 1.51 m、梁间距 2.4 m,宽跨比 0.62,属于宽桥,横截面如图 1 所示。钢主梁采用 Q345 钢材,高 1.25 m,桥面板采用 C50 混凝土,厚度 0.26 m。在预制工厂将钢梁与预制桥面板组合成单片主梁后运至施工现场进行吊装,吊装完成后在现场栓接或焊接钢横撑,最后浇筑各主梁间的湿接缝。

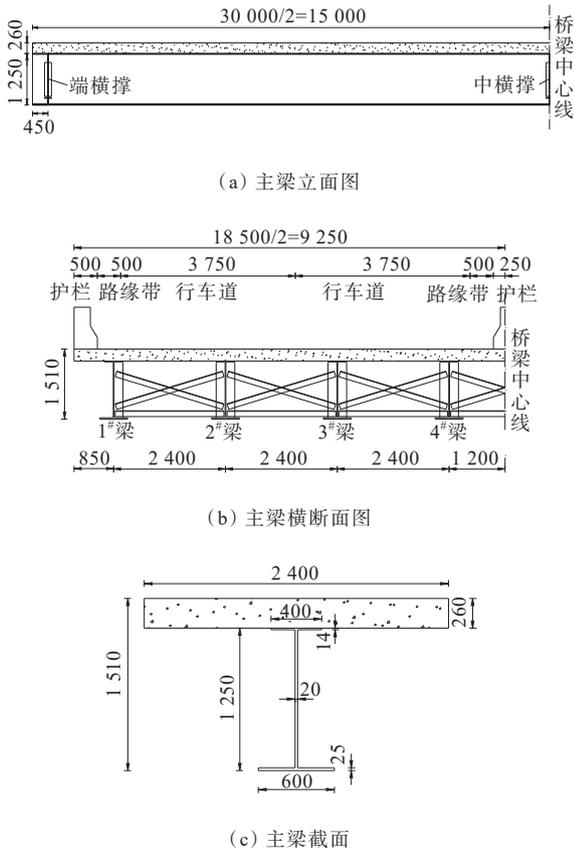


图 1 钢板组合梁的总体布置(单位:mm)

3 有限元分析

为得到较真实的荷载横向分布情况,使用 Ansys 计算软件分别建立跨中不设或设一道钢横撑全桥空间有限元模型。

3.1 空间有限元模型

针对不同的结构构件选取了不同的单元类型进行模拟,如表 1 所示,材料属性如表 2 所示。划分网格时均采用映射网格划分,除混凝土竖向(两层)和钢梁顶板(横向 100 mm,纵向 150 mm)网格大小外,其他网格大小均为 150 mm。空间有限元模型如图 2 所示。

表 1 单元类型选取

模拟对象	选择单元类型
钢梁及加劲肋	Shell 63
混凝土桥面板	Solid 65
钢横撑	Beam 188
壳-实体连接	MPC 多点约束
壳-梁连接	MPC 184

表 2 材料属性

材料名称	弹性模量/GPa	泊松比
混凝土	34.5	0.2
钢材	206.0	0.3

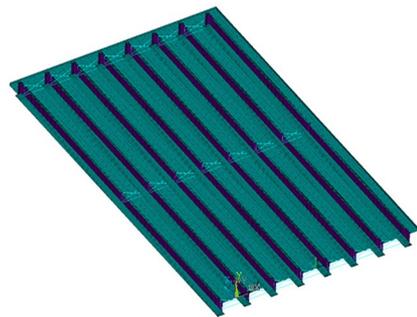


图 2 空间有限元模型

3.2 荷载施加方法

将半波正弦分布荷载沿纵桥向依次施加在横桥上的 15 个位置,如图 3 所示,提取荷载作用不同位置时各主梁的跨中挠度,按各主梁跨中挠度的比例来计算各主梁分配到的荷载比例,得到横向分布影响线。荷载作用在横桥向位置 j 时 i 号梁的影响线竖坐标值可表示为:

$$\eta_{ij} = \frac{\omega_{ij}}{\sum_{i=1}^n \omega_{ij}} \quad (9)$$

式中: ω_{ij} 为荷载作用在 j 位置时 i 号梁的跨中挠度; n 为主梁数量。

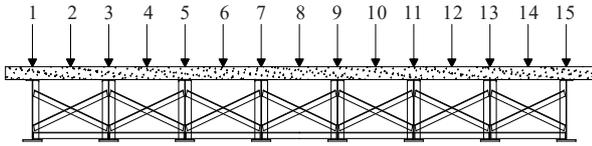
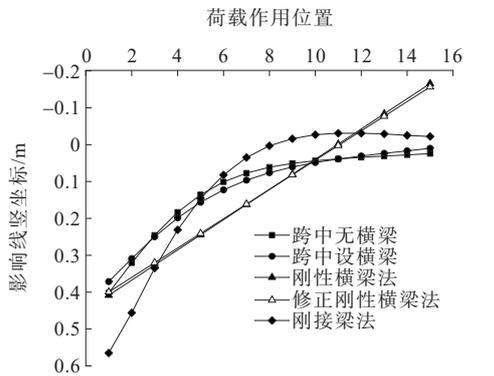
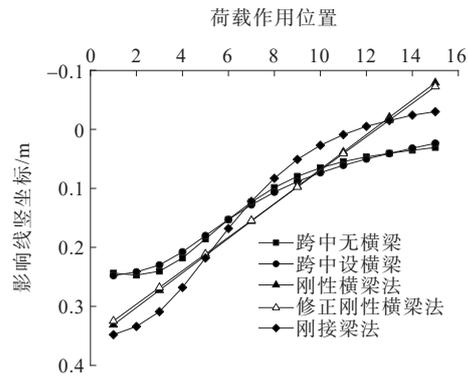


图3 荷载沿横向施加位置

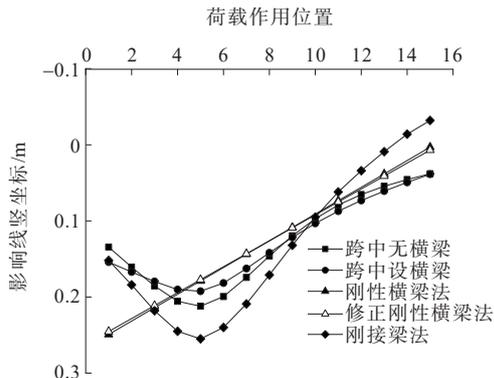
在得到荷载横向分布影响线后,寻找车辆荷载最不利的布载位置,即可求解得到荷载横向分布系数。



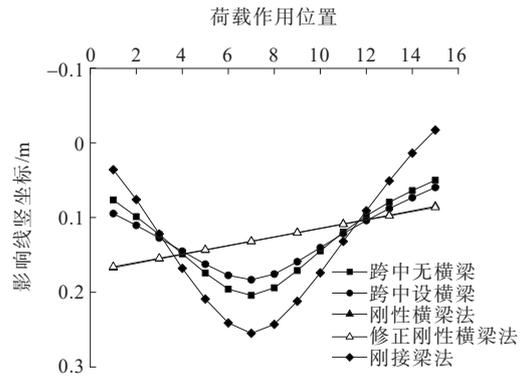
(a) 1#梁



(b) 2#梁



(c) 3#梁



(d) 4#梁

图4 不同计算方法的各梁跨中荷载横向分布影响线

由计算结果可知:跨中不设钢横撑与设一道钢横撑时的荷载横向分布影响线基本重合;(修正)刚性横梁法计算得到的结果偏差较大,刚接梁法计算得到的荷载横向分布影响线与有限元计算结果较接近。

4.2 适用性分析

得到各主梁的荷载横向分布影响线后,将车道荷载按最不利位置进行布载,根据式(10)计算得到各梁的荷载横向分布系数如表3所示。

$$m_i = \sum_{j=1}^n \frac{\eta_{ij}}{2} \quad (10)$$

式中: i 为主梁编号; j 为车道荷载作用位置; n 为车道荷载布载数量。

4 各计算方法的对比及适用性讨论

采用刚接梁法、刚性横梁法、修正刚性横梁法和国外计算方法计算各梁的荷载横向分布系数,并与有限元计算结果进行对比(不考虑车道横向折减系数)。

4.1 荷载横向分布影响线

各主梁的荷载横向分布影响线计算结果见图4。

由表3可知:中梁4#梁与边梁1#梁的荷载横向分布系数接近,因此,中梁与边梁可采用相同的截面尺寸;(修正)刚性横梁法在计算中梁4#梁的荷载横向分布系数偏小,较不安全;S-over法和Zokaie计算公式过于保守;刚接梁法和美国AASHTO LRFD规范与有限元法计算得到的结果接近,且各梁的荷载横向分布系数均比有限元计算结果大,较可靠。

5 参数分析

影响桥梁荷载横向分布的因素很多,在跨径、主梁间距和横向联系数量确定后,还有桥面板厚度和

表 3 不同计算方法的结果对比

计算方法	荷载横向分布系数			
	1 [#] 梁	2 [#] 梁	3 [#] 梁	4 [#] 梁
有限元(跨中无钢横撑)	0.582	0.568	0.566	0.607
有限元(跨中设一道钢横撑)	0.588	0.570	0.553	0.581
刚性横梁法	0.705	0.636	0.584	0.531
修正刚性横梁法	0.694	0.628	0.578	0.529
刚接梁法	0.663	0.620	0.616	0.701
S-over法	1.432	1.432	1.432	1.432
Zokaie计算公式	1.382	1.286	1.286	1.286
AASHTO LRFD规范	0.692	0.644	0.644	0.644

钢横撑尺寸需要考虑。因此,本文主要探究桥面板厚度和钢横撑尺寸对主梁荷载横向分布的影响。

5.1 桥面板厚度

钢梁高度不变,分别取桥面板厚度为 220 mm、260 mm、300 mm,研究分析桥面板厚度对各梁的荷载横向分布系数的影响。计算得到各梁的荷载横向分布影响线如图 5,荷载横向分布系数如表 4 所示。

由计算结果可知:增加桥面板厚度可减小各梁的荷载横向分布系数,从中梁至边梁的影响逐渐减小;跨中设一道钢横撑时,改变桥面板厚度对各梁荷载横向分布影响较小,跨中不设钢横撑时,桥面板厚

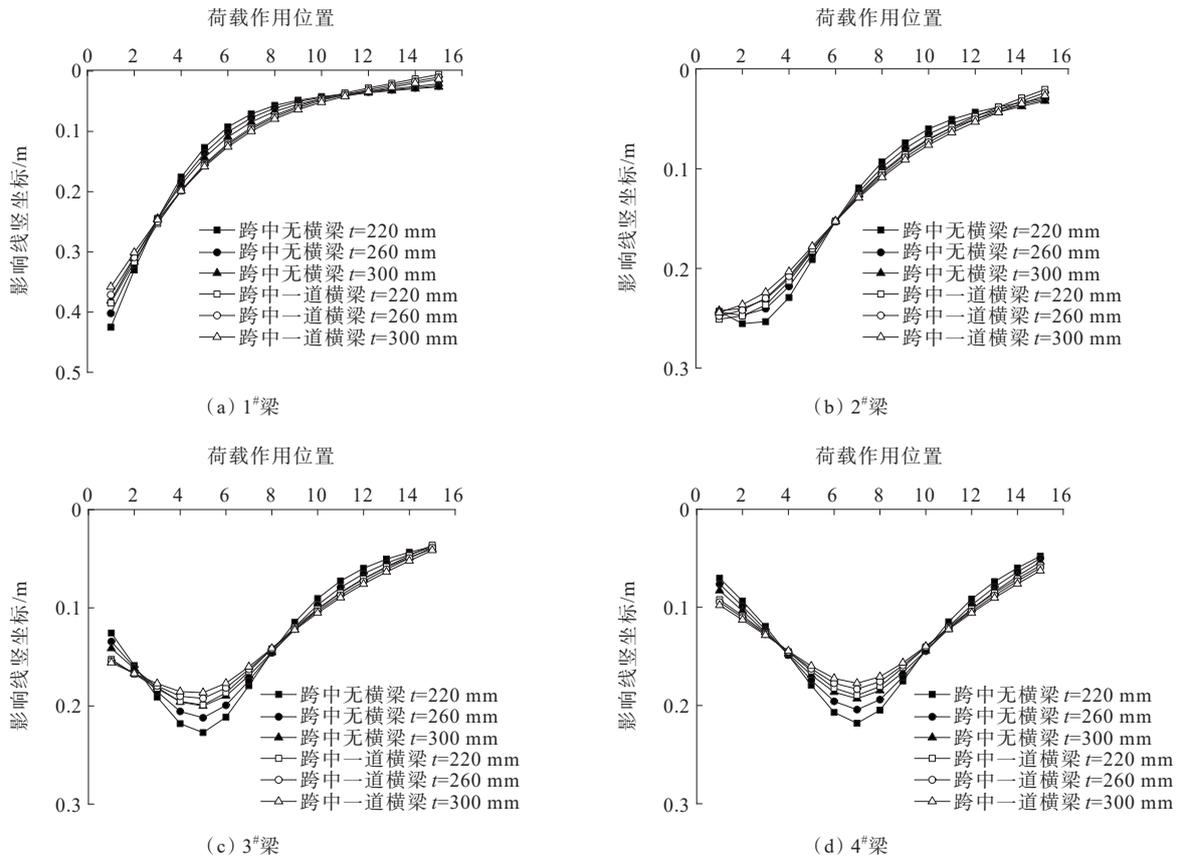


图 5 不同桥面板厚度下的各梁跨中荷载横向分布影响线

表 4 不同桥面板厚度下的各梁荷载横向分布系数

钢横撑布置	桥面板厚度/mm	荷载横向分布系数				m_{max}
		1 [#] 梁	2 [#] 梁	3 [#] 梁	4 [#] 梁	
跨中无钢横撑	220	0.583	0.573	0.574	0.616	0.616
	260	0.582	0.568	0.566	0.607	0.607
	300	0.581	0.565	0.559	0.596	0.596
跨中设一道钢横撑	220	0.590	0.573	0.557	0.586	0.590
	260	0.588	0.570	0.553	0.581	0.588
	300	0.586	0.567	0.549	0.574	0.586

注: m_{max} 为各主梁之间荷载横向分布系数的最大值。

度由 220 mm 增加到 300 mm 后,最大荷载横向分布系数约减小 3.25%;跨中设一道钢横撑时,桥面板厚度由 220 mm 增加到 300 mm 后,最大荷载横向分布系数仅减小了约 0.68%。因此,增大桥面板厚度对各梁荷载横向分布的影响很小。

5.2 钢横撑尺寸

跨中设一道钢横撑时,选取钢横撑尺寸 $\perp 25$ mm \times 4 mm、 $\perp 90$ mm \times 8 mm、 $\perp 110$ mm \times 10 mm 和 $\perp 200$ mm \times 14 mm,研究分析钢横撑刚度对荷载横向

分布的影响。各梁荷载横向分布系数如表5所示,计算得到各梁荷载横向分布影响线如图6所示。

由计算结果可知:增大钢横撑尺寸可减小3[#]梁和4[#]梁的荷载横向分布系数,但会增大1[#]梁和2[#]梁的荷载横向分布系数,钢横撑从 $\angle 25\text{ mm}\times 4\text{ mm}$ 增大至 $\angle 200\text{ mm}\times 14\text{ mm}$ 后,3[#]梁和4[#]梁的荷载横向分布系数分别减小了3.36%和6.29%,1[#]梁和2[#]梁的荷载横向分布系数分别增大了1.55%和0.18%;当钢横撑尺寸为 $\angle 110\text{ mm}\times 10\text{ mm}$ 时,各梁间最大的荷载横向

分布系数最小。因此,钢横撑刚度并非越大越好,需根据实际情况选择。

表5 不同钢横撑尺寸下的各梁荷载横向分布系数

横撑尺寸/ (mm×mm)	荷载横向分布系数				
	1 [#] 梁	2 [#] 梁	3 [#] 梁	4 [#] 梁	m_{\max}
$\angle 25\times 4$	0.582	0.569	0.565	0.604	0.604
$\angle 90\times 8$	0.586	0.569	0.557	0.590	0.590
$\angle 110\times 10$	0.588	0.570	0.553	0.581	0.588
$\angle 200\times 14$	0.591	0.570	0.546	0.566	0.591

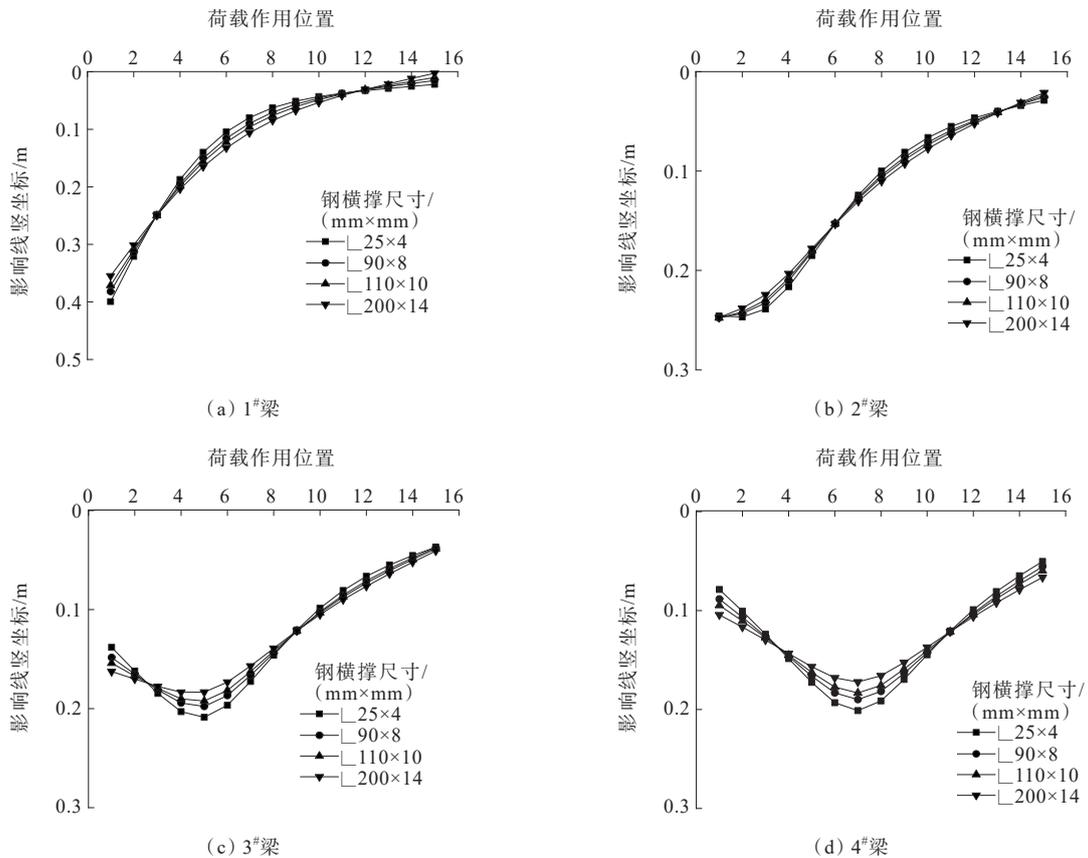


图6 不同钢横撑尺寸下的各梁跨中荷载横向分布影响线

6 结论

本文全面阐述了国内外钢板组合梁桥荷载横向分布系数的计算方法,讨论了各计算方法对于少横向联系钢板组合宽梁桥的适用性,并研究分析了跨中不设或设一道横向联系、桥面板厚度和钢横撑尺寸对该桥荷载横向分布的影响,得到结论如下:

(1) 中梁与边梁的荷载横向分布系数接近,因此中梁与边梁可采用相同的截面尺寸。

(2) 在计算该类型桥梁的荷载横向分布系数时,刚接梁法和AASHTO LRFD规范给出的计算方法较为适用。

(3) 桥面板厚度对荷载横向分布的影响很小。

(4) 随着钢横撑刚度的增大,各梁最大荷载横向分布系数先减小后增大,钢横撑刚度并非越大越好,需根据实际情况选择。

参考文献:

[1] 程子涵. 钢板组合梁桥关键受力性能分析与试验研究

- [D].长沙:湖南大学,2020.
- [2] 龚臻,李翠平,雷洛.复杂艰险条件下钢混组合桥梁设计应用[J].中外公路,2022,42(2):131-137.
- [3] 曹皓,孙敦华,王子琛,等.空心板梁桥表观病害与荷载横向分布关联分析[J].中外公路,2023,43(3):114-121.
- [4] 黄卫国,俞博,易汉斌.装配式空心板梁桥铰缝数值分析与试验研究[J].中外公路,2019,39(6):133-136.
- [5] 邵旭东.桥梁工程[M].4版.北京:人民交通出版社股份有限公司,2016.
- [6] 陈洪伟,贺国栋,王甜.多梁式工形截面钢混组合梁桥荷载横向分布的参数分析[J].中外公路,2021,41(3):161-165.
- [7] 陈俊,马涛,李红.T形梁桥单面受火后荷载横向分布系数研究[J].中外公路,2021,41(3):141-146.
- [8] 王月钱,刘近龙,刘勇.在役拱梁组合体系景观桥梁荷载试验分析[J].北京工业职业技术学院学报,2023,22(3):6-9.
- [9] AASHTO LRFD. Bridge design specifications[S]. Washington D C: American Association of State Highway and Transportation Officials,2020.
- [10] 金辉.锚贴型钢-混凝土组合加固装配式空心板桥试验与计算方法研究[D].西安:长安大学,2021.
- [11] 黄旭升.考虑相对转角的空心板梁桥铰缝损伤识别方法研究[D].合肥:安徽建筑大学,2022.
- [12] 黄卫国,俞博,易汉斌.装配式空心板梁桥铰缝数值分析与试验研究[J].中外公路,2019,39(6):133-136.
- [13] 闫林君,张经纬,罗奎.装配式多主梁钢-混组合梁桥的荷载横向分布研究[J].公路交通科技,2020,37(3):59-69.
- [14] 唐小兵,黄爱,贾志伟,等.论刚接板(梁)法荷载横向分布系数计算方法的不足[J].武汉理工大学学报,2016,38(11):72-75,86.
- [15] YOUSIF Z, HINDI R. AASHTO-LRFD live load distribution for beam-and-slab bridges: Limitations and applicability[J]. Journal of Bridge Engineering, 2007, 12(6): 765-773.
- [16] 聂建国,张晓光,樊健生,等.钢-混凝土组合梁加宽混凝土梁桥的横向分布系数[J].清华大学学报(自然科学版),2010,50(6):805-809.
- [17] 项贻强,何余良,刘丽思,等.考虑滑移的多梁式组合小箱梁桥荷载横向分布[J].哈尔滨工业大学学报,2012,44(8):113-118.
- [18] 李院军,郭晓光,黄成,等.考虑主梁损伤的装配式梁桥荷载横向分布系数计算[J].铁道科学与工程学报,2019,16(6):1459-1465.
- [19] 魏志刚,刘寒冰,时成林,等.考虑桥面铺装作用的简支梁桥荷载横向分布系数计算[J].吉林大学学报(工学版),2018,48(1):105-112.
- [20] 马驰,刘世忠.考虑剪切变形的多梁式改进型波形钢腹板组合小箱梁桥荷载横向分布系数计算[J].华南理工大学学报(自然科学版),2020,48(7):104-114.
- [21] 陈强,孟阳君,周先雁.大宽跨比桥梁荷载横向分布系数的快速计算方法[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2011,30(6):1287-1289,1334.
- [22] 李立峰,程子涵,冯威,等.不等横向联结系对钢-混组合梁桥荷载横向分布的影响研究[J].铁道科学与工程学报,2020,17(11):2832-2839.
- [23] CHEN C, YANG C Q. Experimental and simulation studies on the mechanical performance of T-girder bridge strengthened with transverse connection[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2019, 33(5).
- [24] ZOKAIE T. AASHTO-LRFD live load distribution specifications[J]. Journal of Bridge Engineering, 2000, 5(2): 131-138.