

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2020.05.011

分离式空心板梁桥的荷载横向分布系数计算方法

蒋冬启,李基成,张于晔,姚 波

(南京理工大学理学院,江苏 南京 210094)

摘要:为推动新型分离式空心板梁桥的工程应用,提出针对该桥型的荷载横向分布系数计算方法。选取主梁间距、桥梁跨径、桥宽和梁高作为影响桥梁横向受力性能的参数,采用 ABAQUS 有限元软件计算不同参数组合的分离式空心板梁桥结构在单车道和多车道荷载作用下的弯矩和剪力横向分布状况,探究关键参数对荷载横向传递的影响规律;通过非线性回归分析法拟合得到弯矩和剪力横向分布系数在不同荷载工况下的计算公式。实桥算例验证结果表明,该方法计算结果可信,具有一定的安全度,能够较好地满足工程设计的要求。

关键词:分离式空心板梁桥;荷载横向分布系数;有限元法;非线性回归分析;计算方法;工程设计

中图分类号:U445 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-1980(2020)05-0453-07

Calculation method of lateral load distribution factor for spread hollow slab bridges

JIANG Dongqi, LI Jicheng, ZHANG Yuye, YAO Bo

(School of Science, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: To promote the engineering application of the new spread hollow slab bridge system, a calculation method for lateral load distribution factors was proposed. The beam spacing, span length, bridge width and beam depth were selected as key parameters affecting the lateral load distribution behavior of bridge structures. Finite element models for bridge configurations with different parameter combinations were established using the ABAQUS software, from which moment and shear distribution factors were determined for one-lane and multi-lane loaded cases and effects of aforementioned parameters were analyzed. Furthermore, design formulas of moment and shear distribution factors were obtained via the nonlinear regression analysis method. Comparisons with test results of a practical bridge indicate that proposed formulas are reliable and applicable for structural designs of spread hollow slab bridges in the engineering practice.

Key words: spread hollow slab bridges; lateral load distribution factor; finite element method; nonlinear regression analysis; calculation method; engineering design

截至 2019 年年底,中国公路桥梁总数已达 87.8 万座,中小跨径桥梁占比 85% 以上^[1]。为中小跨径桥梁选取合适的桥型,对保证交通体系的运营安全和节约建设成本至关重要。混凝土空心板梁桥(图 1(a))因其自重轻且预制化程度高,广泛应用于 10~20 m 跨径公路桥梁中。然而调查发现,在超载超限车辆作用下,该桥型易出现“单板受力”的病害,主要表现为铰缝混凝土破损进而逐步丧失横向传递荷载的能力^[2]。李均进^[3]针对性地提出一种新式桥型——分离式空心板梁桥(图 1(b)),该桥型中各主梁沿横向分离式布置,取消铰缝构造,相邻主梁通过悬臂翼缘间搭接钢筋、现浇湿接缝增强梁间的横向联系。该新式桥型可以有效地避免铰缝破坏,保证施工质量,具有较好的应用前景。根据实际需求,空心板梁的板宽可选取 1.0 m

基金项目: 国家自然科学基金(51808292);江苏省自然科学基金(BK20180487);江苏省大学生创新创业训练计划(201810288048X)

作者简介: 蒋冬启(1989—),男,副教授,博士,主要从事桥梁结构研究。E-mail: jiangdongqi@njust.edu.cn

引用本文: 蒋冬启,李基成,张于晔,等. 分离式空心板梁桥的荷载横向分布系数计算方法[J]. 河海大学学报(自然科学版),2020,48(5):453-459.

JIANG Dongqi, LI Jicheng, ZHANG Yuye, et al. Calculation method of lateral load distribution factor for spread hollow slab bridges [J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2020, 48(5):453-459.

和 1.25 m 这 2 种,桥宽也可按设计需要做相应调整。

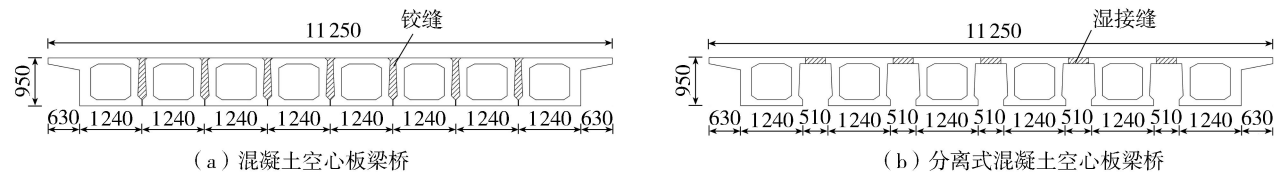


图 1 2 种空心板梁桥的截面形式 (单位:mm)
Fig.1 Cross sections of two types of hollow slab bridges (units: mm)

荷载横向分布系数是桥梁结构设计的关键参数,它将桥面系受荷的空间问题转化为平面问题,通过计算分配比例系数获得不同主梁的内力。对于横向分布系数的求解,国内一般采用梁格法(以刚性横梁法为代表)、梁系法(以刚接梁法和铰接板法为代表)和板系法(以比拟正交异性板法为代表)3 类实用空间理论分析方法^[4]。对于传统的装配式铰接空心板梁桥,国内设计人员通常采用铰接板法计算荷载横向分布系数,对于相同截面的正交空心板梁桥已形成满足设计要求的影响线竖标表^[5]。陈记豪等^[6]基于铰接板法推导出一般力法方程,可用于材料属性和主梁截面尺寸均不同的任意铰接空心板梁桥的荷载横向分布影响线计算。魏保立等^[7]在铰接板法的基础上,进一步考虑了铰缝连接处的损伤,建立了针对损伤桥梁的荷载横向分布计算方法。王渠等^[8]结合模型试验,研究了铰接板法和刚接梁法对不同铺装层厚度的拼宽空心板梁桥荷载横向分布计算的适用性。刘其伟等^[9]通过对比空心板梁桥的荷载横向分布计算方法,建议采用实体有限单元法进行准确计算。相较于国内通常采用的 3 类实用空间理论分析手段,美国 AASHTO LRFD 规范^[10]给出了桥梁结构荷载横向分布系数的简化计算方法,它通过改变主梁间距、桥梁跨径、主梁刚度和桥面板厚度等关键参数,基于大量数值分析结果回归得到边梁和中梁的荷载横向分布系数计算公式,便于设计人员使用。

为研究不同参数对荷载横向分布系数的影响,国内外学者做了大量工作。Westergaard^[11]首次指出主梁间距是影响荷载横向分布的最关键因素,并提出了相关计算公式。Marx 等^[12]在对不同桥型的研究中发现除主梁间距外,主梁刚度、跨径和桥面板厚度对弯矩的横向分布都有一定影响。Barr 等^[13]针对预应力混凝土桥梁的荷载横向分布进行研究,建立了包含主梁间距、跨径和斜交角的计算公式。王浩等^[14]分析了连接刚度对加宽空心板桥荷载横向分布的影响,并指出湿接缝刚度的增加可以有效改善桥梁的整体工作性能。聂瑞锋等^[15]以弯矩为变量,采用非线性回归分析拟合得到含铰缝损伤的既有空心板梁桥的弯矩横向分布计算公式。

上述研究和计算方法主要针对传统装配式铰接空心板梁桥,新型分离式空心板梁桥以现浇湿接缝代替铰缝,其在车辆作用下的荷载横向分布规律尚不明晰。因此,本文借鉴 AASHTO LRFD 规范^[10]的方法,选取影响桥梁结构受力性能的关键参数,采用有限单元法分析不同参数组合下分离式空心板梁桥受单车道和多车道荷载作用的弯矩和剪力的横向分布状况,并基于非线性回归分析方法对有限元数据进行拟合,提出该桥型的荷载横向分布系数计算公式。此外,选取实桥算例,对本文所提公式的准确性和适用性进行验证。

1 有限元计算

1.1 有限元模型

桥梁结构的横向受力性能受许多参数影响,参考 AASHTO LRFD 规范^[10]选取主梁间距(S)、桥梁跨径(L)、桥宽(B)和梁高(d)作为关键参数,并采用 ABAQUS 软件建立不同参数组合的有限元模型以全面分析该桥型的空间受力特性。计算桥例由 4 种桥梁跨径(10 m、13 m、16 m 和 20 m),7 种桥宽(8.5 m、10 m、11.25 m、12.75 m、13.5 m、16.5 m 和 16.75 m),10 种主梁间距(1.153 m、1.200 m、1.222 m、1.343 m、1.400 m、1.510 m、1.607 m、1.750 m、1.875 m 和 2.083 m)和 4 种梁高(0.6 m、0.7 m、0.8 m 和 0.95 m)组合而成,共计 40 个有限元模型。根据《公路桥梁通用图集(板梁系列)》^[16],空心板梁跨径和梁高一一对应。桥宽与车道数相关,决定了车辆荷载的加载模式:8.5 m 桥宽对应两车道加载,10 m、11.25 m 和 12.75 m 桥宽对应三车道加载,13.5 m 桥宽对应四车道加载,16.5 m 和 16.75 m 桥宽对应五车道加载。

模型中空心板梁和湿接缝采用实体单元 C3D8R 模拟,钢筋和预应力筋采用桁架单元 T3D2 模拟;各构

件的混凝土和钢筋材料参数依据《公路桥梁通用图集(板梁系列)》^[16]选取。图 2 为典型分离式空心板梁桥的有限元模型,建模时假定空心板梁和湿接缝黏结良好,不同部件间采用 Tie 绑定约束;主梁两端的支承条件为简支约束。

1.2 车辆荷载的模拟和加载工况

有限元模拟采用的标准车辆荷载参照 JTG D60—2015《公路桥涵设计通用规范》^[17]给出。根据桥梁跨径和最不利原则,不同车轴沿纵桥向布置以获得最大弯矩和剪力(图 3,图 3(a)中虚箭头代表所有车轴的合力位置)。因桥宽、车道数和边梁/中梁截面形式存在差异,标准车辆荷载沿横桥向分布也有所不同(图 4)。本文针对每一个有限元模型进行不同形式的车辆加载,以全面探究弯矩和剪力的横向分布状况。内力计算结果按横向车道布载系数进行折减,针对单车道、双车道和三车道,该系数依规范^[17]分别取 1.20、1.00 和 0.78。



图 2 典型分离式空心板梁桥有限元模型
Fig. 2 Finite element model of a typical spread hollow slab bridge

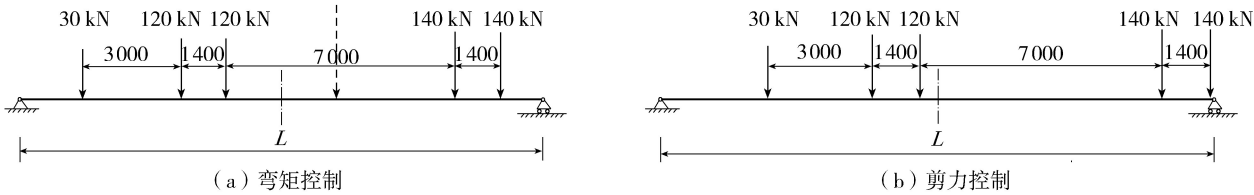


图 3 标准车辆荷载沿纵桥向加载示意图(单位:mm)
Fig. 3 Standard vehicle load applying along the longitudinal direction (units: mm)

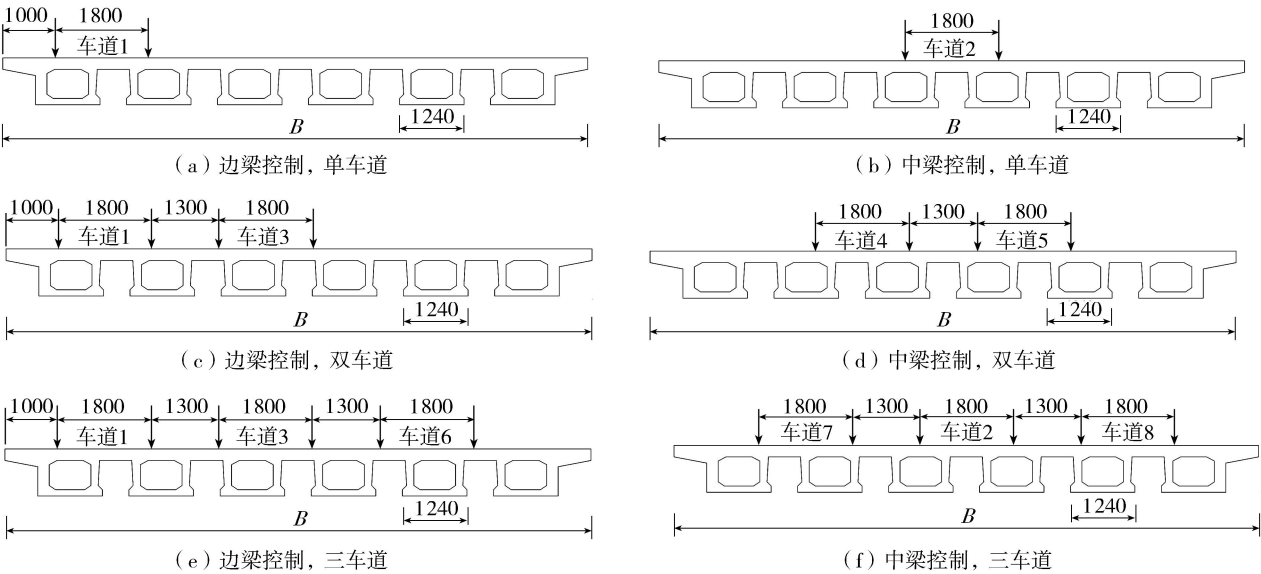


图 4 标准车辆荷载沿横桥向加载模式(单位:mm)
Fig. 4 Standard vehicle load pattern across the bridge section (units: mm)

2 非线性回归分析

2.1 概述

通过有限元分析获得不同参数组合和荷载工况下的最不利弯矩和剪力横向分布系数,为回归分析和公式拟合提供了充足的数据样本。在回归分析中,分别以 L 、 S 和 d 作为自变量,以弯矩横向分布系数(g_m)和剪力横向分布系数(g_v)作为变量,通过幂函数(ax^b)进行公式拟合,其中系数 a 和幂指数 b 通过最小二乘法回归确定。根据《公路桥梁通用图集(板梁系列)》^[16], d 和 L 高度耦合,故公式拟合中仅将 L 和 S 视为独立参数,不考虑 d 的影响。

非线性回归拟合分析分为4个步骤:(a)采用控制变量法分析各参数对荷载横向分布系数的影响,并确定不同参数对应的幂指数;(b)针对不同桥梁算例,依据式(1)确定桥例*i*对应的形状系数 a_i ;(c)对所有桥例的形状系数 a_i 进行统计学分析,取平均值作为“最佳拟合”系数 a ,采用对数正态标准差 β 评估系数 a 和幂指数 b_1 、 b_2 的可靠性,其中 b_1 为*S*对应的幂指数; b_2 为*L*对应的幂指数;(d)建立荷载横向分布系数计算公式,必要时作适当修正,使其具有95%以上的可靠度(式(2))。

$$a_i = \frac{g_i}{S_i^{b_1} L_i^{b_2}}$$

(1)

$$g = kaS_i^{b_1} L_i^{b_2}$$

(2)

式中: g_i ——桥例*i*对应的最不利荷载横向分布系数; L_i ——桥例*i*的跨径; S_i ——桥例*i*的主梁间距; k ——修正系数。

2.2 不同参数对荷载横向分布的影响

由图5~6可知,荷载横向分布系数随*S*的增加而提高,随*L*的增加而降低;多车道作用下的弯矩和剪力横向分布往往更为不利,建议用于工程设计中的内力计算。不同工况下,*S*、*L*与 g_M 、 g_V 的相关性由幂函数回归公式表征,指数 b_i 的大小反映了不同参数的影响程度。由图5和图6中趋势线可见,通常情况下,*S*对荷载横向分布系数的影响相较于*L*更为显著,这与Zokaie等^[18]的研究结论一致,基于有限元分析数据回归拟合得到的幂指数(b_1 , b_2)和对应的决定系数(R^2)。一般情况下, R^2 大于0.75,回归拟合度较好。特别指出的是,对于单车道荷载作用下的边梁,剪力影响范围较小,*L*对该工况的影响较弱;此时在对变量*L*进行拟合时,回归幂指数 b_2 几乎为0,决定系数 R^2 仅为0.285,相关性较差。

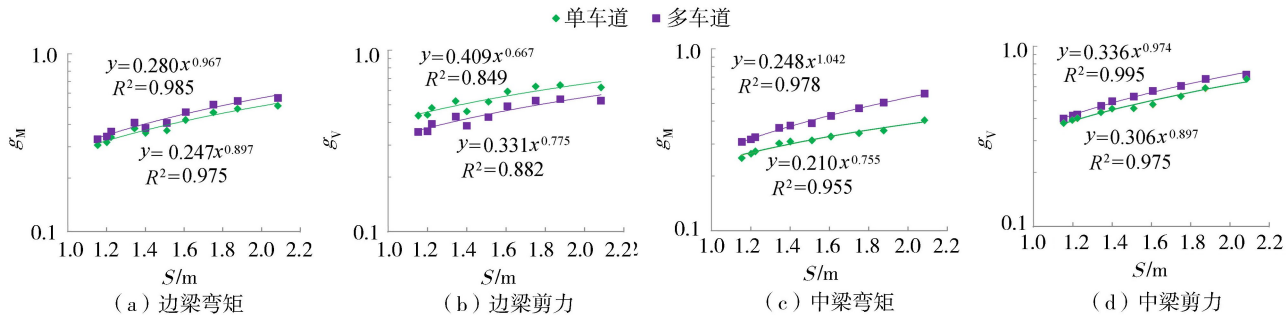


图5 主梁间距对弯矩和剪力横向分布系数的影响

Fig.5 Influences of beam spacing on moment and shear distribution factors

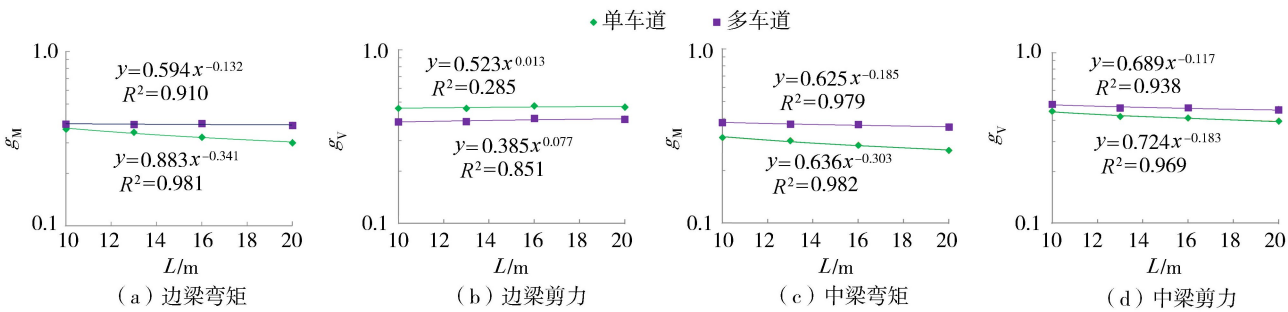


图6 桥梁跨径对弯矩和剪力横向分布系数的影响

Fig.6 Influences of span length on moment and shear distribution factors

2.3 公式拟合与修正

在回归所得幂指数(b_1 , b_2)的基础上,采用式(1)求解40个桥例在不同工况下的系数 a_i 。统计学分析表明,系数 a_i 基本符合对数正态分布,且 β 小于0.2,因此本文采用平均值作为拟合公式的系数 a 。限于篇幅,仅列出不同内力和荷载工况下的8个荷载横向分布系数公式(表1),表中*S*、*L*采用国际单位制。

表 1 荷载横向分布系数建议公式

Table 1 Recommended equations for lateral load distribution factors

中梁/边梁	车道数	弯矩横向分布系数公式	剪力横向分布系数公式
中梁	单车道	$g_M = k_M 0.470 S^{0.755} L^{-0.303}$	$g_V = k_V 0.498 S^{0.897} L^{-0.183}$
	多车道	$g_M = k_M 0.407 S^{1.042} L^{-0.185}$	$g_V = k_V 0.458 S^{0.974} L^{-0.117}$
边梁	单车道	$g_M = k_M 0.616 S^{0.897} L^{-0.341}$	$g_V = k_V 0.401 S^{0.667} L^{0.013}$
	多车道	$g_M = k_M 0.401 S^{0.967} L^{-0.132}$	$g_V = k_V 0.274 S^{0.775} L^{0.077}$

为了使建议公式具有 95% 以上的可靠度,进一步针对弯矩和剪力提出相应的修正系数。通过试算分别取 $k_M = 1.10$ 和 $k_V = 1.10$,由图 7 可见,超过 95% 的数据点分布于 $k = 1.10$ 修正线(蓝色)的上方。图 8 中比值曲线呈对数正态分布,所有数值中处在 1.0 左侧的点少于 5%,验证了建议公式的可靠度。

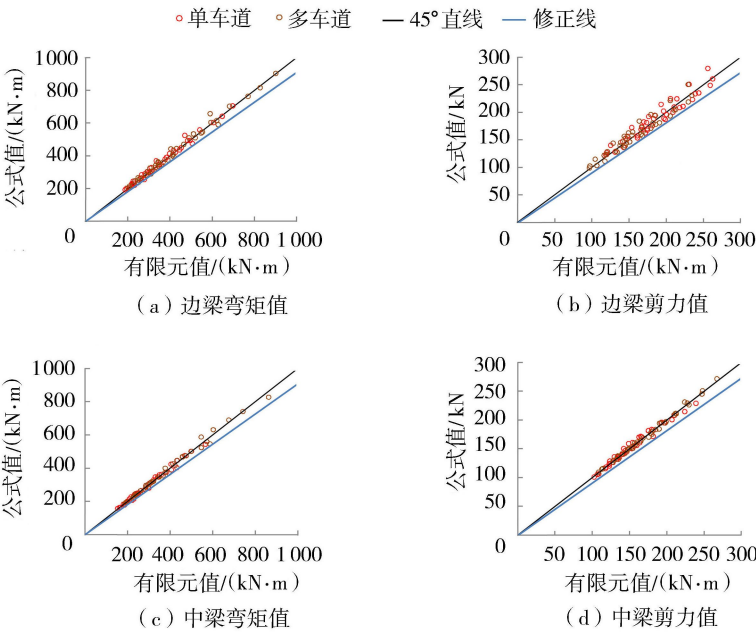


图 7 有限元与公式计算荷载横向分布系数结果对比

Fig. 7 Comparisons of load distribution factors determined from recommended equations and FEM analyses

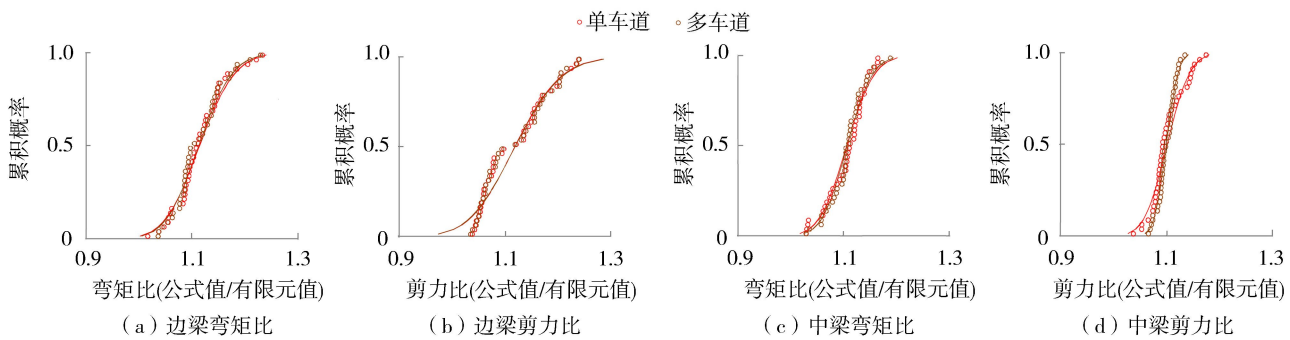


图 8 弯矩和剪力比值的累积概率分布

Fig. 8 Cumulative distribution of moment and shear force ratios

3 算例验证

本文分别采用回归计算公式和 3 种常用的实用空间理论方法(杠杆法、刚性横梁法和铰接板法)计算国内外 2 座实桥的荷载横向分布系数,并与现场试验测量值进行对比。需要指出的是,新型分离式空心板梁桥提出时间较短,目前尚无实际工程应用,本文选取截面形式类似的混凝土小箱梁桥进行验证工作,算例的基本参数见表 2。

表2 实桥算例参数

Table 2 Detailed parameters of actual bridge cases

桥例序号	B/m	L/m	S/m	d/m	车道数	梁数	参考文献
1	18.50	30.00	3.62	1.60	4	5	钟小军 ^[19]
2	10.82	18.75	2.19	0.84	2	5	Douglas等 ^[20]

图9中,钟小军^[19]的实桥现场试验提供跨中与支点处的荷载横向分布系数,而Douglas等^[20]仅测量各主梁跨中应变以推算弯矩横向分布系数,此处剪力横向分布系数取相同值用于对比。由图9可得:(a)建议公式计算所得的荷载横向分布系数与现场实测数值接近,且偏于安全,可用于实际工程应用;(b)对于弯矩控制的中梁,3种实用空间理论方法计算所得的弯矩横向分布系数总体上偏于保守,设计富余度较大;(c)对于剪力控制的中梁,刚性横梁法和铰接板法在桥例1中的荷载横向分布系数较低,偏不安全;(d)对于弯矩和剪力控制的边梁,刚性横梁法的计算结果偏大,而杠杆法和铰接板法计算所得的剪力横向分布系数在桥例2中低于试验值,设计时应加以注意。

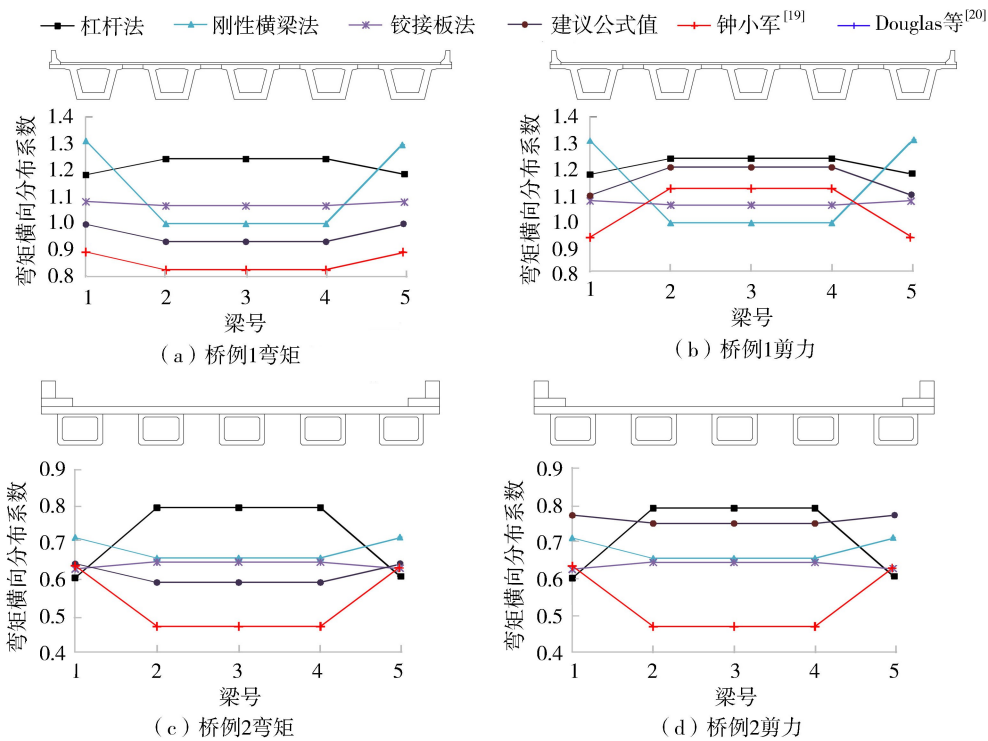


图9 不同方法所得荷载横向分布系数对比

Fig. 9 Comparison of lateral load distribution factors determined from various calculation methods

4 结 语

选取影响桥梁结构受力性能的关键参数,通过建立不同参数组合的分离式空心板梁桥有限元模型,分析了该桥型在单车道和多车道荷载作用下的弯矩和剪力横向分布状况,并基于非线性回归分析方法对有限元数据进行拟合,提出了适合工程应用的荷载横向分布系数计算公式。实例验证结果表明,该方法计算可信,具有一定的安全度和较高的实用价值,有望推动分离式空心板梁桥的实际应用。

参考文献:

[1] 中华人民共和国交通运输部. 2019 交通运输行业发展统计公报[EB/OL]. [2020-05-12]. http://xxgk.mot.gov.cn/jigou/zhghs/202005/t20200512_3374322.html.

[2] 王渠,吴庆雄,陈宝春. 装配式空心板桥铰缝破坏模式试验研究[J]. 工程力学,2014,31(增刊1):115-120. (WANG Qu, WU Qingxiong, CHEN Baochun. Experimental study on failure mode of hinged joint in assembly voided slab bridge[J]. Engineering Mechanics,2014, 31(Sup1):115-120. (in Chinese))

[3] 李均进. 新型空心板结构受力分析[D]. 西安:长安大学, 2012.

[4] 范立础. 桥梁工程(上册)[M]. 北京:人民交通出版社,2017:229-231.

[5] 程翔云. 铰接板荷载横向分布影响线竖标表的扩宽应用[J]. 中南公路工程, 1990(1):41-44. (CHENG Xiangyun. Extended application of lateral load distribution influence line table in hinge-joint slabs[J]. Central South Highway Engineering, 1990(1):41-44. (in Chinese))

[6] 陈记豪, 赵顺波, 姚继涛. 既有预应力空心板桥加宽设计的荷载横向分布计算方法[J]. 工程力学, 2012,29(9):265-271. (CHEN Jihao, ZHAO Shunbo, YAO Jitao. Method for calculating vehicle load transverse distribution in widening design of existing PPCHS bridge[J]. Engineering Mechanics,2012, 29(9):265-271. (in Chinese))

[7] 魏保立, 邓苗毅. 损伤桥梁的荷载横向分布计算方法研究[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2015,34(1):102-108. (WEI Baoli, DENG Miaoyi. Computational method analysis for transverse load distribution of damage bridge[J]. Journal of Henan Polytechnic University(Natural Science),2015, 34(1):102-108. (in Chinese))

[8] 王渠, 吴庆雄, 陈康明, 等. 拼宽空心板桥荷载横向分布计算方法[J]. 中国公路学报, 2019, 32(7):57-65. (WANG Qu, WU Qingxiong, CHEN Kangming, et al. Calculation method of load transverse-distribution for widening hollow slab bridge [J]. China Journal of Highway and Transport,2019, 32(7):57-65. (in Chinese))

[9] 刘其伟, 王成明, 李捷. 装配式空心板桥荷载横向分布计算方法比较分析[J]. 建筑科学与工程学报, 2011, 28(7):100-105. (LIU Qiwei, WANG Chengming, LI Jie. Comparison and analysis of calculation method of transverse load distribution for fabricated hollow slab bridge[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering,2011, 28(7):100-105. (in Chinese))

[10] American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). AASHTO LRFD bridge design specifications, 6th Edition[S]. Washington D. C. : AASHTO, 2017.

[11] WESTERGAARD H M. Computations of stresses in bridge slab due to wheel loads[J]. Public Roads, 1931,1: 1-23.

[12] MARX H, KHACHATURIAN N, GAMBLE W. Development of design criteria for simply supporter skew slab-and-girder bridges [R]. Urbana-Champaign: University of Illinois at Urbana-Champaign, 1986.

[13] BARR P, EBERHARD M, STANTON J. Live-load distribution factors in prestressed concrete girder bridges[J]. Journal of Bridge Engineering, 2001, 6(5): 295-306.

[14] 王浩, 朱若溪, 张肇红. 连接刚度对加宽桥梁荷载横向分布的影响分析[J]. 公路,2013(7):143-146. (WANG Hao, ZHU Ruoxi, ZHANG Zhaozhong. Analysis of effects of connection stiffness on the lateral load distribution of widened bridges[J]. Highway,2013(7):143-146. (in Chinese))

[15] 聂瑞锋, 石雪飞, 阮欣, 等. 在役多车道空心板梁桥弯矩横向分布系数计算方法研究[J]. 桥梁建设,2014,44(2):56-60. (NIE Ruifeng, SHI Xuefei, RUAN Xin, et al. Research of calculation method for moment lateral distribution factors of multi-lane hollow slab bridges in service[J]. Bridge Construction,2014,44(2):56-60. (in Chinese))

[16] 湖南省交通勘察设计研究院. 公路桥梁通用图集(板梁系列)[S]. 北京:人民交通出版社, 2008.

[17] 中交公路规划设计院有限公司. 公路桥涵设计通用规范: JTGD60—2015[S]. 北京:人民交通出版社, 2015.

[18] ZOKAIE T, IMBSEN R, OSTERKAMP T. Distribution of wheel loads on highway bridges [R]. Washington, D. C. : Transportation Research Board, 1991.

[19] 钟小军. 装配式小箱梁桥荷载横向分布系数探究[J]. 中国市政工程, 2013(2):17-19. (ZHONG Xiaojun. Study on lateral load distribution factors of fabricated small box-beam bridges[J]. China Municipal Engineering,2013(2):17-19. (in Chinese))

[20] DOUGLAS W, VANHORN D. Lateral distribution of static Loads in prestressed concrete box-beam bridge: drehersville bridge [R]. Bethlehem: Lehigh University, 1966.

(收稿日期:2020 - 03 - 23 编辑:刘晓艳)