

DOI: 10.7672/sgjs2025200104

钢-UHPC 组合箱梁桥荷载横向分布系数研究^{*}

张 留¹, 王文炜²

(1. 中铁十五局集团第四工程有限公司, 河南 新郑 451150;

2. 东南大学交通学院, 江苏 南京 211189)

[摘要] 为研究钢-UHPC 组合箱梁横向分布系数, 建立有限元分析模型, 比较有限元计算结果与相关文献试验结果, 验证有限元模型的正确性。在此基础上, 建立多片主梁形成的钢-UHPC 组合箱梁桥横向分布系数有限元分析模型, 与现有理论分析方法进行比较, 提出基于修正偏心压力法的主梁抗扭修正系数。计算结果表明, 采用修正偏心压力法计算钢-UHPC 组合箱梁桥横向分布系数可行, 主梁抗扭修正系数 $\beta=0.3$ 。桥梁宽跨比 ≤ 0.5 时, 采用修正偏心压力法比偏心压力法更合理; 桥梁宽跨比 > 0.8 时, 偏心压力法和修正偏心压力法均不再适用于组合箱梁荷载横向分布系数计算。UHPC 桥面板抗压强度和厚度不影响荷载横向分布系数。荷载位置由 1/4 跨截面至跨中截面变化时, 对于中梁, 采用偏心压力法和修正偏心压力法计算荷载横向分布系数均可应用, 对于其他主梁, 推荐采用修正偏心压力法进行计算。

[关键词] 桥梁; 钢-UHPC 组合箱梁; 有限元分析; 横向分布系数; 修正偏心压力法; 抗扭修正系数

[中图分类号] U445 [文献标识码] A [文章编号] 2097-0897(2025)20-0104-08

Load Lateral Distribution Coefficient Research of Steel-UHPC Composite Box Girder Bridge

ZHANG Liu¹, WANG Wenwei²

(1. China Railway 15th Bureau Fourth Engineering Co., Ltd., Xinzheng, Henan 451150, China;

2. School of Transportation, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 211189, China)

Abstract: In order to study the lateral distribution coefficient of steel-UHPC composite box girder, a finite element analysis model was established, and the finite element analysis model was compared with the test results of relevant literature to verify the correctness of the finite element model. On this basis, a finite element analysis model for the lateral distribution coefficient of a steel-UHPC composite box girder bridge formed by multiple main beams was established, and compared with existing theoretical analysis methods. A torsional correction coefficient of the main beam based on the modified eccentric pressure method was proposed. The calculation results indicate that it is feasible to use the modified eccentric pressure method to calculate the lateral distribution coefficient of the steel-UHPC composite box girder bridge, and the torsional correction coefficient of the main girder is 0.3. When the width to span ratio of a bridge is less than or equal to 0.5, the modified eccentric pressure method is more reasonable than the eccentric pressure method. When the width to span ratio of a bridge is greater than 0.8, both the eccentric pressure method and the modified eccentric pressure method are no longer applicable for calculating the lateral distribution coefficient of load in composite box girders. The compressive strength and thickness of UHPC bridge deck slab do not affect the load lateral distribution coefficient. When the load position changes from 1/4 span section to mid span section, both the eccentric pressure method and the modified eccentric pressure method can be used to calculate the lateral distribution coefficient of the load for the mid beam. For other main girders, the modified eccentric pressure method is recommended

^{*} 国家自然科学基金(51878156); 中铁十五局创新科研项目(CR1504-GL-YX-2021-GC-JS-006)

[作者简介] 张 留, 高级工程师, E-mail: 38358480@qq.com

[收稿日期] 2025-04-20

for calculation.

Keywords: bridges; steel-UHPC composite box girder; finite element analysis; lateral distribution coefficient; modified eccentric pressure method; torsion correction coefficient

0 引言

钢-UHPC 组合箱梁桥是一种新型桥梁结构形式,由钢箱梁和 UHPC 桥面板组成,可充分利用 UHPC 材料的高强特性,减小上部结构几何尺寸和自重,增大跨越能力。与钢-混凝土组合箱梁桥相比,UHPC 良好的抗疲劳性能和耐久性能,在全生命周期内具有较好的经济性^[1-4]。与钢桥相比,可增大主梁截面惯性矩和抗弯、抗扭承载力,提高结构稳定性。钢-UHPC 组合箱梁桥是由多片钢箱主梁、桥面板和横向连接构件组成的整体受力结构,对于单片钢-UHPC 组合箱梁,需确定横向分布系数,将空间问题转化为平面问题,以便于设计计算。

李瑞琪等^[5]采用 MIDAS 板单元模型对装配式简支钢-混组合小箱梁桥横向分布系数理论计算方法进行校核,提出了梁格法参数取值建议;当横向联系间距为 $(1/2 \sim 1/15)L$ 、桥面板厚度为 150 ~ 300mm 时,对荷载横向分布系数影响很小。柯红军等^[6]研究了活性粉末混凝土(RPC)-正交异性组合桥面的荷载横向分布系数规律,结果表明 RPC 组合桥面比纯钢桥面荷载横向分布系数更均匀,RPC 厚度增加时横向分布系数变化幅度逐渐减小,建议 RPC 板厚度为 50mm。李立峰等^[7]研究了中等跨径窄幅钢-混凝土组合箱梁桥荷载横向分布系数,结果表明:在横向连接数量足够多时,可在梁端和跨中设置横向连接,此时横向连接刚度对荷载分布的影响较小;采用刚性横梁法或刚接梁法进行计算,结果偏于安全。刘志忠^[8]研究了工字钢-混凝土组合箱梁荷载横向分布系数,分析了 5 种理论计算结果与有限元计算的误差,得出修正刚性横梁法计算更合理,实腹式横梁、桁架式横梁对荷载横向分布系数几乎无影响。丁炜等^[9]采用 4 种理论方法计算钢-混组合板梁桥荷载横向分布系数,探讨了各计算方法误差成因,分析了桥面板厚度、主梁高度、主梁间距、内横梁数量对荷载横向分布系数的影响规律。王思伟等^[10]研究了钢板组合连续梁桥负弯矩区的栓钉布置形式和横梁设置方法对荷载横向分布系数的影响,结果表明,采用抗拔不抗剪栓钉或间断设置横梁时,可降低荷载横向分布系数峰值。

综上所述,目前对于组合结构桥梁荷载横向分布系数的研究,多集中在钢箱梁或工字钢梁与传统混凝土形成的组合箱梁桥荷载横向分布系数,然而对于

采用 UHPC 桥面板的组合箱梁桥荷载横向分布系数研究工作有限。本文建立钢-UHPC 组合箱梁桥有限元分析模型,比较计算结果与相关文献的试验结果,验证有限元模型的正确性。在此基础上,建立多片主梁形成的钢-UHPC 组合箱梁桥荷载横向分布系数有限元分析模型,分析计算结果,提出基于修正偏心压力法的荷载横向分布系数计算方法。

1 UHPC 本构关系和有限元模型的验证

UHPC 作为一种新型材料,需采用合适的本构关系模型。同时,有待进一步验证 UHPC 与钢梁构成的组合箱梁有限元模型的适用性。因此,本文选取文献[11]中钢-UHPC 组合箱梁试验数据,采用 ABAQUS 有限元软件进行有限元仿真分析。

如图 1 所示,文献[11]中试验梁为简支梁,长度为 5 200mm,计算跨径为 5 000mm,UHPC 板宽度为 600mm,主梁高度为 440mm,采用两点对称加载,加载点间距为 1 000mm,剪跨段长度为 2 000mm。

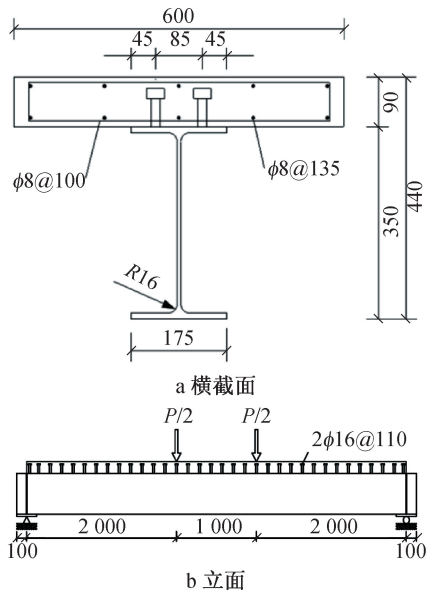


图 1 钢-UHPC 组合箱梁示意
Fig. 1 Steel-UHPC composite box girder

钢梁翼缘板厚 11mm,腹板厚 7mm。栓钉直径 16mm,纵向双列布置,间距 110mm。UHPC 板内配置 $\phi 8$ 钢筋,纵向配筋率 0.93%,横向配筋率 1.01%。钢梁采用 Q235 型钢,钢梁与 UHPC 材料力学性能指标如表 1 所示。

UHPC 单轴受压应力-应变关系曲线采用赵继之等^[12]提出的拟合公式,认为 UHPC 是具有密实

表 1 钢材和 UHPC 材料力学性能

Table 1 Mechanical properties of steel and UHPC materials						MPa
UHPC			钢材			
抗折强度 f_b	抗压强度 f_c	弹性模量 E_c	屈服强度 f_y	抗拉强度 f_u	弹性模量 E_s	
17.4	133.3	3.88×10^4	253	369	2.0×10^5	

微观结构的高性能复合材料,其受压应力与应变近似为线性关系,采用双线性模型表征受压本构关系如式(1)所示。

$$\sigma_c = \begin{cases} E_c \varepsilon_c & (\varepsilon_c \leq \varepsilon_{ca}) \\ f_{ca} \left[1 - \alpha_c \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{ca}} - 1 \right) \right] & (\varepsilon_c > \varepsilon_{ca}) \end{cases} \quad (1)$$

式中: E_c 为 UHPC 初始弹性模量; ε_c 为 UHPC 单轴受压应变; f_{ca} 为 UHPC 单轴受压峰值应力; ε_{ca} 为 UHPC 单轴受压峰值应变; α_c 为 UHPC 单轴受压下降段的斜率,由试验数据确定,取值为 0.35。

此外,当压应力 $<0.4f_{ca}$ 时,UHPC 单轴受压应力-应变关系曲线变为水平直线。

UHPC 受拉应力-应变关系曲线上升段采用张哲等^[13]提出的双线性拟合公式,下降段采用线性拉伸软化模型,考虑极限应变前的弹性上升阶段和塑性硬化阶段(下降),计算如式(2)所示。

$$\sigma_t = \begin{cases} \frac{f_{ta}}{\varepsilon_{ta}} \varepsilon_t & (0 < \varepsilon_t \leq \varepsilon_{ta}) \\ f_{ta} \frac{\varepsilon_{tu} - \varepsilon_t}{\varepsilon_{tu} - \varepsilon_{ta}} & (\varepsilon_{ta} < \varepsilon_t \leq \varepsilon_{tu}) \end{cases} \quad (2)$$

式中: f_{ta} 为 UHPC 单轴抗拉强度; ε_{ta} 为 UHPC 单轴受拉峰值应变; ε_{tu} 为 UHPC 单轴受拉极限应变。

在有限元分析模型中,除了材料本构关系外,还需确定材料损伤因子。参考相关文献^[14],UHPC 损伤因子可按式(3)计算。

$$d = 1 - \sqrt{\frac{\sigma}{E_0 \varepsilon}} \quad (3)$$

式中: ε 为 UHPC 单轴应变(压应变或拉应变)。

将式(1)代入到式(3),即可得到 UHPC 单轴受压损伤因子 d_c 。参照以上方法,原则上可求出 UHPC 单轴受拉损伤因子 d_t ,由于本文 UHPC 单轴受拉应力-应变关系采用双线性拟合公式,同时文献^[14]研究表明,对于钢-UHPC 组合简支梁,UHPC 板主要受压,其受拉性能对简支梁受力性能影响较小,所以本文假定 UHPC 单轴线性拉伸塑性损伤因子 d_t 随应变增加而线性增大,当应变达到极限拉伸应变时, d_t 达最大值 0.9。

UHPC 采用八节点减缩积分实体单元(C3D8R)

模拟。文献^[15]对组合箱梁有限元模拟计算时栓钉与 UHPC 的接触关系进行分析,结果表明,组合箱梁中栓钉与 UHPC 板采用面面接触方式得出的仿真结果与试验值吻合最佳。因此,栓钉与 UHPC 采用面面接触方式,其中表征切向属性的摩擦系数取 0.3^[16]。建立 1/2 模型,选择对称边界条件。同时,采用位移加载方式,精细化分网格,网格尺寸为 15mm,以保证模型计算收敛。建立的钢-UHPC 组合箱梁有限元模型如图 2 所示。为避免应力集中,钢垫块底部施加竖向与横向约束作为边界条件。荷载以面荷载形式施加于加载板顶面,大小为 $P/2A$, A 为加载板顶面面积,荷载施加位置与图 1b 一致。

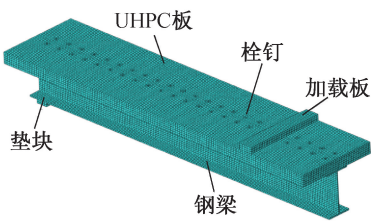


图 2 钢-UHPC 组合箱梁有限元模型
Fig. 2 Finite element model of steel-UHPC composite box girder

计算结果如图 3 所示。由图 3 可知,有限元模拟得出的钢-UHPC 组合箱梁荷载-位移曲线与文献试验数据趋势基本吻合,但有限元模拟的组合箱梁弹性段略有增加,原因是有限元材料参数取值、试验测量误差或试验模型梁在制作过程中存在初始缺陷等情况。有限元模拟得出的钢-UHPC 组合箱梁 UHPC 板顶面荷载-纵向应变曲线和钢梁下翼缘底面荷载-纵向应变曲线与文献试验数据增长趋势基本一致,因此,本文建立的有限元模型能较好地模拟钢-UHPC 组合箱梁受弯变形全过程,验证了 UHPC 本构关系模型的准确性,再一次证明有限元模型接触关系设置的正确性。

2 横向分布系数有限元计算

2.1 有限元模型

与单片主梁抗弯性能的研究不同,梁桥是由多片主梁、桥面板和横向连接构件组成的空间整体受力结构。当荷载作用于桥跨不同位置时,各主梁所分担的荷载可通过横向分布系数确定。桥梁全长 50m,桥面宽 26m,双向 6 车道,设计荷载标准为公路-I 级。钢梁跨中截面梁高 2 250mm,端部梁高 1 650mm,底板厚 30mm、宽 1 500mm,腹板厚 14mm、斜率为 5:1。钢梁顶面翼缘板宽 600mm、厚 25mm,2 块翼缘板中心间距为 2 300mm。横桥向由 6 片钢箱

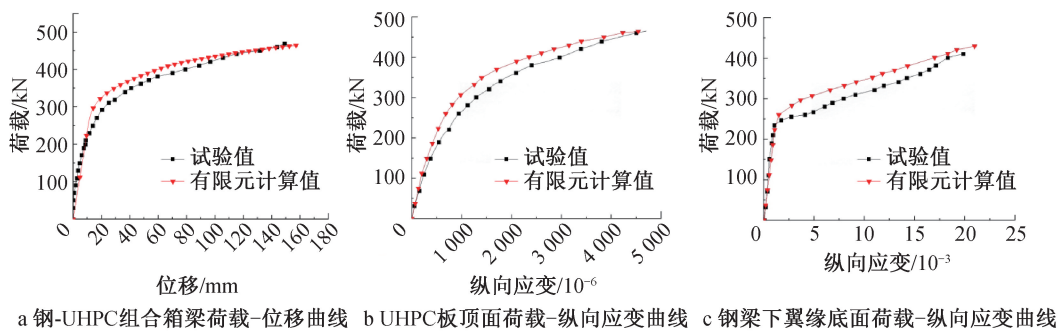


图 3 钢-UHPC 组合箱梁试验结果与有限元模拟结果对比

Fig. 3 Comparison of test results and finite element simulation results for steel-UHPC composite box girder

梁组成,从左到右依次编号为1~6号主梁。

目前,GB 50917 — 2013《钢-混凝土组合桥梁设计规范》^[17]对于混凝土桥面板厚度要求 $\geq 180\text{mm}$,考虑 UHPC 材料抗压、抗拉性能较好,按规范要求的最小值确定 UHPC 桥面板厚度,即 180mm。同时,UHPC 桥面板上有 100mm 厚沥青混凝土铺装层。钢-UHPC 组合箱梁桥跨中横断面如图 4 所示。

筋则嵌入桥面板混凝土中。钢-UHPC 组合箱梁桥有限元模型如图 5 所示。

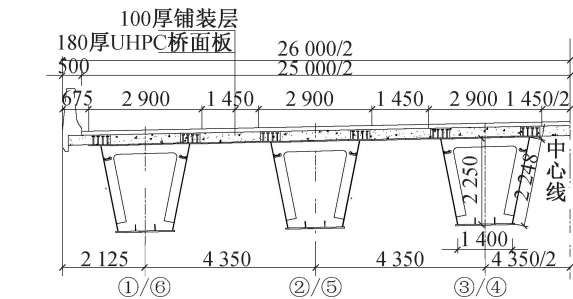


图 4 钢-UHPC 组合箱梁桥跨中横断面

Fig. 4 Mid-span cross section of steel-UHPC composite box girder bridge

钢梁和横向连接件采用 Q355q-D 级结构钢,屈服强度为 325MPa,极限强度为 490MPa,弹性模量为 202GPa;连接件选用 ML15AL 级焊钉;UHPC 抗压强度为 130MPa,弹性模量取 42GPa;钢筋选用 HPB300,HRB400 级钢筋。

在结构设计及实际工程应用中,组合箱梁桥面板和钢梁未达到屈服强度,桥面板与钢梁相对滑移较小,假定 UHPC 桥面板与钢梁完全刚接,不考虑桥面板与钢梁间的界面滑移现象。UHPC 桥面板与钢梁连接较好,横桥向连续,不考虑材料非线性。

桥面板和垫块采用八节点六面体线性减缩积分实体单元(C3D8R)模拟,钢梁选用八节点六面体线性非协调模式单元(C3D8I)模拟,全桥模型网格尺寸 $\leq 200\text{mm}$ 。由于桥梁结构尺寸较大,且钢筋受力并非研究重点,因此按实际配筋率布置钢筋网进行模拟。此外,桥面板与钢梁间采用绑定连接,钢



图 5 钢-UHPC 组合箱梁桥有限元模型

Fig. 5 Finite element model of steel-UHPC composite box girder bridge

在组合箱梁桥跨中截面进行加载,沿横桥向在桥面板顶面每隔单位距离依次施加荷载,获取主梁竖向位移。因横桥向为对称结构,所以从主梁最左边沿横桥向至中点位置,共选取 12 个加载点。设置 12 个分析步,前一个分析步荷载不传递给下一个分析步,即每个分析步独立计算,以实现移动荷载的模拟。计算求出不同加载情况下各主梁竖向位移,然后根据式(4)计算各片主梁荷载横向分布影响线的竖向坐标值。

$$\eta_{ik} = \frac{y_{ik}}{\sum_{i,k=1}^n y_{ik}}$$

(4)

式中: η_{ik} 为荷载作用在第 k 号主梁时第 i 号主梁横向分布影响线竖向坐标值; y_{ik} 为荷载作用在第 k 号主梁时第 i 号主梁竖向位移。

2.2 计算结果分析

钢-UHPC 组合箱梁桥跨中截面 1,2,3 号主梁横向分布影响线如图 6 所示。箱梁可按等面积和等惯性矩原则转换为 T 梁,因此计算中将荷载施加于箱梁中性轴位置。图中同时给出了采用偏心压力法和修正偏心压力法计算的荷载横向分布影响线。从图中可以看出,采用偏心压力法计算的影响线值与有限元计算结果相差较大,而采用修正偏心压力法计算的影响线值与有限元计算结果较接近。说

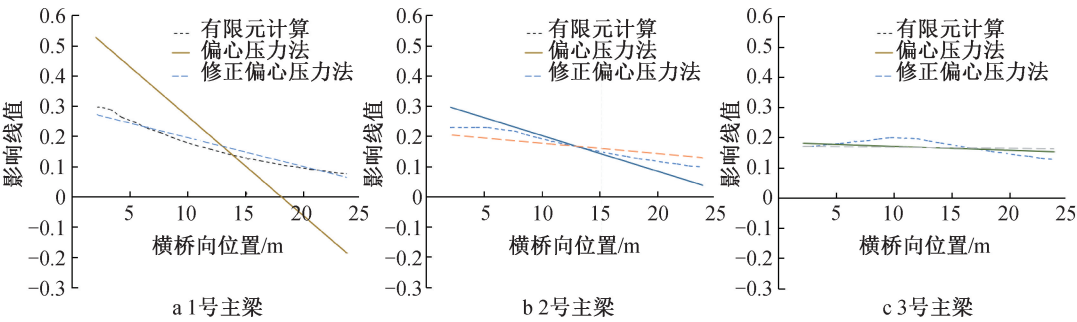


图 6 主梁荷载横向分布影响线

Fig. 6 Load lateral distribution influence lines of main girders

明主梁抗扭刚度和桥梁跨宽比对荷载横向分布影响线影响较大,通过修正系数 β 可调整荷载横向分布系数。

考虑主梁抗扭刚度,采用修正偏心压力法得到 k 号主梁横向影响线竖向坐标值为:

$$\eta_{ki} = \frac{I_k}{\sum_{i=1}^n I_i} \pm \beta \frac{ea_k I_k}{\sum_{i=1}^n a_i^2 I_i} \tag{5}$$

式中: β 为抗扭修正系数,取决于结构几何尺寸和材料特性, $\beta = \frac{1}{1 + \frac{Gl^2}{12E} \cdot \frac{\sum I_{Ti}}{\sum a_i^2 I_i}}$,当主梁截面和间距

相同时, $\beta = \frac{1}{1 + \frac{n l^2 G I_T}{12 E I \sum a_i^2}}$, $\frac{n}{12 \sum a_i^2} = \frac{\zeta}{B^2}$, ζ 为与主

梁数量相关的系数,本文为 6 根主梁, ζ 取值为 1.028; a_i 为主梁中心距桥面中心间距; I_T 为梁抗扭惯性矩; G 为钢梁剪切模量, $G = \frac{E}{1 + \mu}$; n 为主梁数量; B 为桥宽,取值为 26m; l 为桥跨,取值为 47.92m。

参考钢-混凝土组合箱梁截面换算方法,将 UHPC 桥面板换算为钢材面积,钢材弹性模量与混凝土弹性模量比值 $n_e=4.8$ 。同时,假定混凝土板与钢梁连接良好,按封闭薄壁截面计算抗扭惯性矩,将主梁截面参数带入,计算抗扭修正系数 $\beta \approx 0.3$ 。

得到主梁跨中荷载横向分布影响线后,按最不利工况布置车道荷载,不考虑人群荷载作用。计算各主梁荷载横向分布系数,与偏心压力法、修正偏心压力法对比情况如表 2 所示。

由表 2 可知,与有限元计算结果比较,1~6 号梁采用偏心压力法计算的荷载横向分布系数误差较大,其中 1,6 号主梁误差最大,误差值为 70.1%,3,4 号主梁误差最小,误差值为 15.6%,表明采用偏心压力法计算荷载横向分布系数是过于安全的计算

表 2 荷载横向分布系数对比

Table 2 Comparison of load lateral distribution coefficient

项目	主梁编号					
	1	2	3	4	5	6
①偏心压力法	1.289	0.972	0.660	0.660	0.972	1.289
②修正偏心压力法	0.730	0.583	0.509	0.509	0.583	0.730
③有限元计算	0.758	0.665	0.571	0.571	0.665	0.758
①与③误差/%	70.1	46.2	15.6	15.6	46.2	70.1
②与③误差/%	3.7	12.3	10.9	10.9	12.3	3.7

方法,在一定程度上限制了组合箱梁桥型的设计计算和经济效益。1~6 号主梁采用修正偏心压力法计算的荷载横向分布系数误差值均小于采用偏心压力法计算结果的误差值,说明主梁抗扭刚度在荷载横向分配时发挥重要作用。采用修正偏心压力法计算的荷载横向分布系数在 2,5 号主梁处误差最大,误差值为 12.3%,在 1,6 号主梁处误差最小,误差值为 3.7%。综合表明,采用修正偏心压力法计算的 47.92m 跨径钢-UHPC 组合箱梁桥跨中截面荷载横向分布系数比偏心压力法计算结果更合理,整体误差值在 15%之内。修正偏心压力法比偏心压力法计算精度高,更接近真实值。

3 横向分布系数影响因素分析

选取桥梁跨径、UHPC 桥面板强度等级、桥面板厚度及纵桥向加载位置作为变量,分析其对荷载横向分布系数的影响。除跨径外,其余变量均以 50m 跨径钢-UHPC 组合箱梁桥为基准,采用控制变量法逐一变化进行分析。

3.1 桥梁跨径

理论和试验研究表明,在桥梁宽跨比 ≤ 0.5 时,在车辆荷载作用下,中间横隔梁弹性挠曲变形同主梁相比较小,桥梁类似偏心受压杆件。但在实际工程中,由于交通量增大导致多数桥梁宽跨比 >0.5 甚至接近于 1。针对不同宽跨比研究荷载横向分布系数规律,对于不同情况的桥梁设计有一定参考价值。

在保持模型其他参数不变的情况下,仅改变桥梁跨径,分别取 30,40,60m,与对照组 50m 跨径钢-

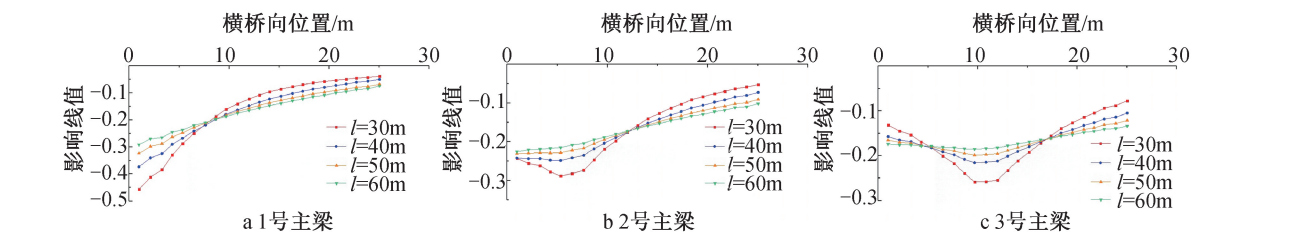


图 7 不同跨径下主梁荷载横向分布影响线

Fig. 7 Load lateral distribution influence lines under different spans

UHPC 组合箱梁桥进行分析比较,通过有限元计算求出 1,2,3 号主梁荷载横向分布影响线,然后按最不利工况布置车道荷载,分析桥梁跨径变化对各主梁荷载横向分布系数的影响。各主梁荷载横向分布影响线如图 7 所示。

按偏心压力法与修正偏心压力法,计算不同跨径下各主梁荷载横向分布系数。其中,跨中截面主梁荷载横向分布系数有限元计算值与偏心压力法、修正偏心压力法理论计算值对比如表 3 所示。

表 3 跨中截面主梁荷载横向分布系数					
Table 3 Load lateral distribution coefficients of mid-span section main girders					
主梁 编号	项目	主梁跨径/m			
		30	40	50	60
1	①偏心压力法	1.289	1.289	1.289	1.289
	②修正偏心压力法	1.130	1.052	0.973	0.894
	③有限元计算	0.947	0.832	0.758	0.719
	①与③误差/%	36.1	54.9	70.1	79.3
	②与③误差/%	19.3	26.4	28.4	24.3
2	①偏心压力法	0.972	0.972	0.972	0.972
	②修正偏心压力法	0.878	0.831	0.785	0.737
	③有限元计算	0.786	0.711	0.665	0.634
	①与③误差/%	23.7	36.7	46.2	53.3
	②与③误差/%	11.7	16.9	18.0	16.2
3	①偏心压力法	0.660	0.660	0.660	0.660
	②修正偏心压力法	0.627	0.610	0.593	0.577
	③有限元计算	0.693	0.607	0.571	0.545
	①与③误差/%	-4.8	8.7	15.6	21.1
	②与③误差/%	-9.5	0.5	3.9	5.6

计算结果表明,对于 1,6 号(对称位置)主梁,随着桥梁跨径增大,采用偏心压力法计算的荷载横向分布系数与有限元计算结果的误差逐渐增大,而采用修正偏心压力法计算的荷载横向分布系数与有限元计算结果误差相对较小。因此,在有一定设计富余度情况下,采用修正偏心压力法计算边主梁荷载横向分布系数更合理。此外,通过有限元计算结果得出,随着桥梁跨径增大,边主梁荷载横向分布系数逐渐减小,说明其他位置主梁可更好地改善边主梁受力情况。

对于 2,5 号(对称位置)主梁,即位于边梁和中

梁间的主梁,随着桥梁跨径增大,采用偏心压力法计算的荷载横向分布系数与有限元计算结果的误差逐渐增大,采用修正偏心压力法计算的荷载横向分布系数与有限元计算结果的误差为 10%~20%。因此,对于钢-UHPC 组合箱梁桥,在 20% 误差允许范围内,建议采用修正偏心压力法计算相应位置主梁荷载横向分布系数。

对于 3,4 号(对称位置)主梁,即中间位置主梁,当桥梁宽跨比近似于 1 时,按偏心压力法和修正偏心压力法计算得出的荷载横向分布系数均小于有限元计算值,说明此时 2 种理论方法求出的荷载横向分布系数不满足设计要求。对于类似跨径的钢-UHPC 组合箱梁桥,当计算中梁荷载横向分布系数时,在桥梁宽跨比>0.5 且<0.8 时,建议采用偏心压力法计算,当宽跨比≤0.5 时,建议采用修正偏心压力法计算。

3.2 UHPC 桥面板抗压强度

在保持模型其他参数不变的情况下,分别取 UHPC 桥面板抗压强度 100,160,190MPa,与对照组 130MPa 抗压强度进行分析比较,各主梁荷载横向分布影响线如图 8 所示。

计算结果表明,当 UHPC 桥面板抗压强度由 100MPa 提高至 190MPa、UHPC 弹性模量从 39GPa 提高至 48GPa 时,1~3 号主梁荷载横向分布系数均无变化。

3.3 UHPC 桥面板厚度

随着桥面板厚度增大,组合箱梁截面刚度变大,所以在分析主梁荷载横向分布系数时也应考虑 UHPC 桥面板厚度。为研究这一规律,在保持模型其他参数不变的情况下,仅改变 UHPC 桥面板厚度,分别取 150,210,240mm,与对照组 180mm 桥面板厚度进行分析比较,各主梁荷载横向分布影响线如图 8 所示。

分析表明,当 UHPC 桥面板厚度从 150mm 增加到 240mm 时,各主梁荷载横向分布系数几乎未增加。因此,在分析钢-UHPC 组合箱梁荷载横向分布系数时,可忽略桥面板厚度变化带来的影响。

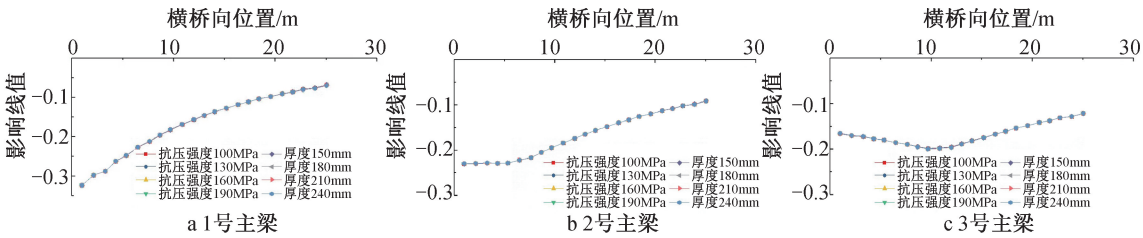


图 8 不同 UHPC 桥面板抗压强度和厚度下主梁荷载横向分布影响线

Fig. 8 Load lateral distribution influence lines of main girders under different compressive strength and thickness of UHPC bridge deck slabs

3.4 纵桥向加载位置

沿纵桥向荷载作用位置不同,各主梁荷载横向分布系数亦不同。理论分析与实践经验表明,计算靠近主梁支点的荷载横向分布系数时,习惯采用杠杆分布原理法,因为大部分荷载通过相邻主梁直接传递至墩台。为研究纵桥向其他位置加载时荷载横向分布系数规律,在保持其他模型参数不变的情况下,选择 1/4 跨截面、1/3 跨截面 2 处加载位置,分析研究各主梁荷载横向分布系数。各主梁荷载横向分布影响线如图 9 所示。

按偏心压力法与修正偏心压力法,计算不同加载位置各主梁荷载横向分布系数。各主梁荷载横向分布系数有限元计算值与偏心压力法、修正偏心压力法理论计算值的对比如表 4 所示。

表 4 主梁荷载横向分布系数对比

Table 4 Comparison of load lateral distribution coefficients of main girders						
主梁编号	加载位置	①偏心压力法	②修正偏心压力法	③有限元计算	①与③误差/%	②与③误差/%
1	1/2 跨加载	1.289	0.973	0.758	70.1	28.4
	1/3 跨加载	1.289	0.973	0.723	78.3	34.6
	1/4 跨加载	1.289	0.973	0.698	84.7	39.4
2	1/2 跨加载	0.972	0.785	0.665	46.2	18.0
	1/3 跨加载	0.972	0.785	0.638	52.4	23.0
	1/4 跨加载	0.972	0.785	0.619	57.0	27.2
3	1/2 跨加载	0.660	0.593	0.571	15.6	3.7
	1/3 跨加载	0.660	0.593	0.552	19.6	7.4
	1/4 跨加载	0.660	0.593	0.540	22.2	9.8

计算结果表明,加载位置由 1/4 跨截面至跨中截面变化时,各主梁荷载横向分布系数逐渐增大,

在跨中截面加载将在边梁位置产生最大荷载横向分布系数;加载位置由 1/4 跨截面至跨中截面变化时,采用偏心压力法和修正偏心压力法计算荷载横向分布系数与有限元计算结果间的误差均逐渐减小;对于中梁,采用偏心压力法和修正偏心压力法计算荷载横向分布系数均可,误差在 20% 左右;对于其他主梁,推荐采用修正偏心压力法进行计算,以减小与真实值间的误差。

4 结语

1)采用修正偏心压力法计算荷载横向分布系数可行,边梁荷载横向分布系数误差最大,中梁误差最小,主梁抗扭修正系数 β 可取 0.3,使各主梁荷载横向分布系数与有限元计算结果误差在 15% 以内。

2)桥梁宽跨比 ≤ 0.5 时,采用修正偏心压力法计算荷载横向分布系数比偏心压力法更合理。随着桥梁宽跨比减小,荷载横向分布系数逐渐减小。桥梁宽跨比 >0.8 时,偏心压力法和修正偏心压力法均不再适用于组合箱梁荷载横向分布系数的计算。

3)随着 UHPC 桥面板抗压强度和厚度的增大,荷载横向分布系数几乎无变化。

4)荷载加载位置由 1/4 跨截面至跨中截面变化时,采用偏心压力法和修正偏心压力法计算荷载横向分布系数与有限元计算结果间的误差均逐渐减小。对于中梁,采用偏心压力法和修正偏心压力法计算荷载横向分布系数均可行。对于其他主梁,推荐采用修正偏心压力法进行计算。

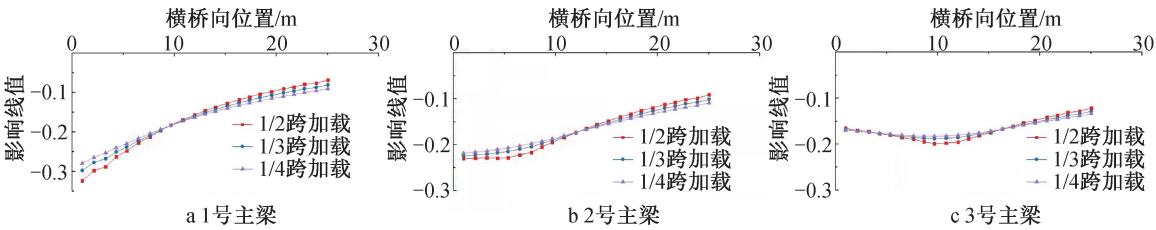


图 9 不同加载位置下主梁荷载横向分布影响线

Fig. 9 Load lateral distribution influence lines of main girders under different loading positions

参考文献:

[1] GU C P, YE G, SUN W. Ultrahigh performance concrete-properties, applications and perspectives [J]. Science China technological sciences, 2015, 58 (4) : 587-599.

[2] RUSSELL H G, GRAYBEAL B A. Ultra-high performance concrete: a state-of-the-art report for the bridge community[R]. 2013.

[3] 刘扬,曾丹,曹磊,等. 钢-UHPC 组合结构桥梁研究进展[J]. 材料导报, 2021, 35 (3) : 3104-3113.

LIU Y, ZENG D, CAO L, et al. Advances of steel-UHPC composite bridge [J]. Materials reports, 2021, 35 (3) : 3104-3113.

[4] YOO S W, CHOO J F. Evaluation of the flexural behavior of composite beam with inverted-T steel girder and steel fiber reinforced ultra high performance concrete slab[J]. Engineering structures, 2016, 118, 1-15.

[5] 李瑞琪,袁万城,高康,等. 装配式简支钢-混组合小箱梁桥荷载向分布系数的研究[J]. 结构工程师, 2015, 31 (4) : 54-59.

LI R Q, YUAN W C, GAO K, et al. The analysis of the transverse distribution coefficient of the simply supported fabricated steel-concrete composite girder bridge[J]. Structural engineers, 2015, 31 (4) : 54-59.

[6] 柯红军,马伟. RPC-正交异性组合桥面荷载横向分布系数研究[J]. 公路与汽运, 2016 (4) : 155-159, 271.

KE H J, MA W. Study on transverse distribution coefficient of load on RPC-orthotropic composite deck [J]. Highways & automotive applications, 2016 (4) : 155-159, 271.

[7] 李立峰,程子涵,冯威,等. 不等横向联结系对钢-混组合箱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.

LI L F, CHENG Z H, FENG W, et al. Study on the effect of unequal transverse bracing systems on the transverse load distribution of steel-concrete composite bridges [J]. Journal of railway science and engineering, 2020, 17 (11) : 2832-2839.

[8] 刘志忠. 钢-混工字组合箱梁横向分布系数计算方法研究[J]. 公路, 2021, 66 (7) : 157-160.

LIU Z Z. Study on calculation method of transverse distribution coefficient of steel-mixed I-beam[J]. Highway, 2021, 66 (7) : 157-160.

[9] 丁炜,李红,王浩,等. 钢混组合板梁桥主梁荷载横向分布系数研究[J]. 公路, 2021, 66 (6) : 195-199.

DING W, LI H, WANG H, et al. Study on transverse distribution coefficient of main beam load of steel-concrete composite plate girder bridge[J]. Highway, 2021, 66 (6) : 195-199.

[10] 王思伟,陈双庆. 钢板组合连续梁桥荷载横向分布影响研究[J]. 江苏科技大学学报 (自然科学版), 2022, 36 (4) : 114-118.

WANG S W, CHEN S Q. Investigation on effects of lateral load distribution on steel-plate composite continuous girder bridges[J]. Journal of Jiangsu University of Science and Technology (natural science edition), 2022, 36 (4) : 114-118.

[11] 刘君平,徐帅,陈宝春. 钢-UHPC 组合箱梁与钢-普通混凝土组合箱梁抗弯性能对比试验研究[J]. 工程力学, 2018, 35 (11) : 92-98, 145.

LIU J P, XU S, CHEN B C. Experimental study on flexural behaviors of steel-UHPC composite girder and steel-conventional concrete composite girder [J]. Engineering mechanics, 2018, 35 (11) : 92-98, 145.

[12] 赵继之,辛公锋,陶慕轩,等. 超高性能混凝土单轴拉、压循环作用下力学性能及其本构模型研究[J]. 工程力学, 2024, 41 (4) : 81-93.

ZHAO J Z, XIN G F, TAO M X, et al. Mechanical properties and constitutive model of ultrahigh performance concrete material under uniaxial tension and compression cycles [J]. Engineering mechanics, 2024, 41 (4) : 81-93.

[13] 张哲,邵旭东,李文光,等. 超高性能混凝土轴拉性能试验[J]. 中国公路学报, 2015, 28 (8) : 50-58.

ZHANG Z, SHAO X D, LI W G, et al. Axial tensile behavior test of ultra high performance concrete [J]. China journal of highway and transport, 2015, 28 (8) : 50-58.

[14] 朱经纬,辛公锋,徐传昶,等. 基于塑性损伤模型的钢-UHPC 组合箱梁抗弯性能分析[J]. 钢结构, 2020, 35 (8) : 24-32.

ZHU J W, XIN G F, XU C C, et al. Analysis of flexural behavior of steel-UHPC composite girders based on plastic damage model[J]. Steel construction, 2020, 35 (8) : 24-32.

[15] 黄赞. 钢板-UHPC 组合箱梁抗弯性能试验及有限元分析[D]. 长沙:湖南大学, 2020.

HUANG B. Bending performance test and finite element analysis of steel plate-UHPC composite beams [D]. Changsha: Hunan University, 2020.

[16] BALTAY P, GJELSVIK A. Coefficient of friction for steel on concrete at high normal stress [J]. Journal of materials in civil engineering, 1990, 2 (1) : 46-49.

[17] 上海市城市建设设计研究总院,同济大学. 钢-混凝土组合桥梁设计规范: GB 50917—2013 [S]. 北京:中国计划出版社, 2014.

Shanghai Urban Construction Design Research Institute, Tongji University. Code for design of steel and concrete composite bridges: GB 50917—2013 [S]. Beijing: China Planning Press, 2014.