

DOI: 10.7511/jslx20220905001

多梁式波形钢腹板工字钢组合梁荷载 横向分布系数研究

吴传山¹, 邓文琴^{*2}, 张焕涛¹, 查上², 张建东^{2,3}

(1. 山东高速济青中线公路有限公司, 潍坊 261516;

2. 南京工业大学 土木工程学院, 南京 211816; 3. 苏交科集团股份有限公司, 南京 211112)

摘要:为探讨多梁式波形钢腹板工字钢组合梁荷载横向分布系数计算方法,同时考虑波形钢腹板抗扭刚度、剪切变形及钢混滑移效应,对传统的偏心压力法、修正偏心压力法及刚接梁法进行修正,并结合有限元模型通过一座典型的4主梁波形钢腹板工字钢组合梁桥对比分析了上述方法的适用性,最后基于参数分析研究了横隔板数量及刚度对其荷载横向分布系数的影响。结果表明,考虑剪切变形及滑移效应的刚接梁法得到的荷载横向分布系数与有限元值符合最好;当桥梁宽跨比小于2时,宜采用刚接梁法计算各主梁荷载横向分布系数,当宽跨比大于2时,宜采用更为简洁的修正偏心压力法进行计算;横隔板的设置可改善各主梁荷载横向均匀分布,但跨间横隔板间距和刚度对其荷载横向分布系数影响较小,实桥设计时可在端部及跨中位置布置横隔板,横隔板刚度及其余部位横隔板数量可根据结构稳定性要求进行布置。

关键词:钢混组合梁;波形钢腹板工字钢梁;荷载横向分布系数;剪切变形;滑移效应;横隔板

中图分类号:TU398.902;O302

文献标志码:A

文章编号:1007-4708(2024)03-0483-08

1 引言

传统多梁式钢混组合梁桥中工字钢梁腹板加劲肋数量多、焊接工作量大且焊接疲劳效应显著,结构集约化程度低。波形钢腹板因其屈曲稳定性好,无需设置纵横向加劲肋,利于工厂标准化加工制作,常用于取代混凝土腹板或平钢板作为主梁的腹板^[1-4]。采用波形钢腹板工字钢梁代替传统钢混组合梁中的平钢腹板工字钢梁,可显著降低焊接工作量,且波形钢腹板主梁横向刚度大,可进一步增大主梁及横梁间距,可提高工业化效率^[5]。鉴于此,本文提出一种面向集约化设计的多梁式波形钢腹板工字钢组合梁结构体系,具有便于标准化加工、方便预制及施工快捷化等优点。

为方便工程计算,现有多主梁桥的内力分析大多借助于荷载横向分布的概念,将多主梁空间计算简化为单梁平面问题进行考虑,国内外学者针对多

主梁桥荷载横向分布系数进行了深入研究。Abendroth等^[6]通过数值模拟研究了横向联结结构形式及数量对多梁式混凝土梁荷载横向分布系数的影响。Mohseni等^[7]对160座多主梁混凝土梁桥进行参数分析,揭示了横隔板形式对斜桥荷载横向分布系数的影响。Zhao等^[8]通过现场荷载试验及数值模拟研究了预制空心板梁桥的荷载横向分布系数分配规律,指出美国AASHTO LRFD规范计算结果过于保守。倪章军等^[9]提出了一种新型GFRP组合梁桥的荷载横向分布系数计算公式。刘华等^[10]提出了一种基于模态参数法的荷载横向分布系数计算方法,并通过模型试验验证了其准确性。聂鑫等^[11]指出横向联系梁对组合箱梁荷载横向分配系数影响较小。马磊等^[12]用刚接梁法推导了单箱多室波形钢腹板组合箱梁荷载横向分布系数计算公式,并采用模型试验进行了验证。战家旺等^[13]基于铰接板法建立了考虑板间胶接

收稿日期:2022-09-05;修改稿收到日期:2023-02-07.

基金项目:国家自然科学基金(51908282);江苏省青年基金(BK20190681);江苏省高等学校自然科学研究面上项目(19KJB580002);山东省交通运输厅科技计划项目(2020B47)资助.

作者简介:邓文琴*(1991-),女,博士,副教授(E-mail:deng_hust@163.com).

引用本文:吴传山,邓文琴,张焕涛,等.多梁式波形钢腹板工字钢组合梁荷载横向分布系数研究[J].计算力学学报,2024,41(3):483-490.
WU Chuan-shan, DENG Wen-qin, ZHANG Huan-tao, et al. Study on the load transverse distribution coefficient of multi-beam composite I-beam with corrugated steel webs[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2024, 41(3): 483-490.

缝的简支板梁荷载横向分布系数简化计算模型。李院军等^[14]基于12座装配式T梁和小箱梁荷载试验数据,提出了考虑主梁损伤折减系数的装配式梁桥荷载分布系数计算方法。马驰等^[15]推导了考虑剪切变形的多梁式波形钢腹板-钢底板组合小箱梁荷载横向分布系数计算方法。李立峰等^[16]通过数值模拟研究了不等横向联系对传统钢混组合梁桥荷载横向分布的影响,并对传统偏心压力法、修正偏心压力法及刚接梁法进行了适用性评价。

综上可知,现有关于荷载横向分布系数研究主要集中在预制混凝土空心板梁、T梁和小箱梁,针对钢混组合梁桥的研究主要集中在传统钢混组合箱梁、波形钢腹板组合箱梁及传统平钢板组合梁桥,尚无针对多梁式波形钢腹板工字钢组合梁桥相关研究。此外,现有计算理论大多未考虑剪切变形及滑移效应对其荷载横向分布系数的影响。由于波形钢腹板工字钢板较薄且存在手风琴效应,本文在既有理论上,充分考虑波形钢腹板抗扭刚度、剪切变形及钢混滑移效应影响,推导多梁式波形钢腹板工字钢组合梁桥荷载横向分布系数计算方法。以一典型工程为背景,对比3种传统方法的适用性,并结合数值模拟,进一步探讨横隔板数量及刚度对其荷载横向分布系数的影响。

2 波形钢腹板工字钢组合梁有效抗弯刚度

既有研究表明^[16],波形钢腹板剪切变形和钢混界面对组合梁挠度的影响不可忽略不计,波形钢腹板工字钢组合梁的挠度可分为3部分组成,按挠度组成计算的组合梁抗弯刚度分配系数为

$$\zeta_0 = \frac{\delta_0}{\delta_0 + \delta_{s1} + \delta_{s2}}, \zeta_{s1} = \frac{\delta_{s1}}{\delta_0 + \delta_{s1} + \delta_{s2}}$$

$$\zeta_{s2} = \frac{\delta_{s2}}{\delta_0 + \delta_{s1} + \delta_{s2}}, \zeta_0 + \zeta_{s1} + \zeta_{s2} = 1 \quad (1)$$

式中 δ_0 为不考虑剪切和滑移效应的挠度, δ_{s1} 为剪切变形引起的附加挠度, δ_{s2} 为钢混界面滑移引起的附加挠度。

考虑剪切变形及滑移效应的波形钢腹板工字钢组合梁有效抗弯刚度 EI_e 为

$$EI_e = \zeta EI_0 \quad (2)$$

式中 EI_0 为不考虑剪切变形及滑移效应的抗弯刚度,由截面换算法确定, ζ 为抗弯刚度分配系数。

3 波形钢腹板工字钢组合梁荷载横向分布系数计算方法

3.1 考虑剪切变形及滑移效应的偏心压力法

偏心压力法也称为刚性横梁法,即假定桥梁跨径方向布置的横隔板为无限刚性,桥梁宽跨比小于0.5时(窄桥),外荷载作用下横隔板梁扭曲变形同主梁变形相比微不足道。图1中单位偏心荷载 $P=1$ (偏心距为 e) 作用时,可等效为中心荷载 $P=1$ 和偏心矩 $M=1 \cdot e$ 叠加考虑。

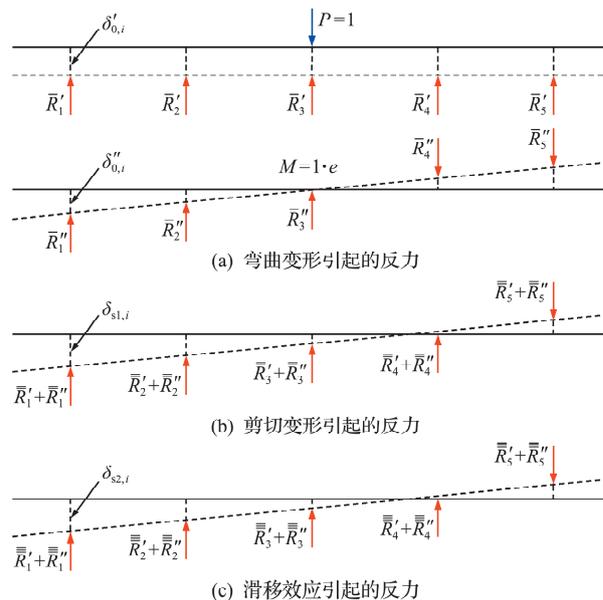


图1 偏心荷载法的荷载分布

Fig. 1 Load distribution diagram for eccentric loading method

(1) 中心荷载 $P=1$ 的作用。假定波形钢腹板工字梁中间横隔板是刚性的,且横截面对称于桥梁纵向中心线,各主梁在中心荷载作用下由弯曲、剪切变形及滑移效应引起的各主梁挠度产生的反力分别为 \bar{R}'_i, \bar{R}'_i 和 \bar{R}'_i 。

则中心荷载 $P=1$ 的作用下,各主梁总挠度引起的反力 R'_i 为

$$R'_i = \bar{R}'_i + \bar{R}'_i + \bar{R}'_i = \frac{\zeta_0 I_{e,i}}{\sum_{i=1}^n I_{e,i}} + \frac{\zeta_{s1} I_{e,i}}{\sum_{i=1}^n I_{e,i}} + \frac{\zeta_{s2} I_{e,i}}{\sum_{i=1}^n I_{e,i}} \quad (3)$$

(2) 偏心力矩 $M=1 \cdot e$ 的作用。同理,偏心力矩 $M=1 \cdot e$ 的作用下由弯曲、剪切变形和滑移效应引起的各主梁反力分别为 \bar{R}''_i, \bar{R}''_i 和 \bar{R}''_i 。

则 $M=1 \cdot e$ 的作用下各根主梁总挠度引起的反力总和 R''_i 为

$$R''_i = \bar{R}''_i + \bar{R}''_i + \bar{R}''_i = \frac{\zeta_0 e a_i I_{e,i}}{\sum_{i=1}^n a_i^2 I_{e,i}} + \frac{\zeta_{s1} e a_i I_{e,i}}{\sum_{i=1}^n a_i^2 I_{e,i}} + \frac{\zeta_{s2} e a_i I_{e,i}}{\sum_{i=1}^n a_i^2 I_{e,i}} \quad (4)$$

(3) 偏心荷载 $P=1$ 对各主梁的总作用。由上述中心荷载 $P=1$ 和偏心力矩 $M=1 \cdot e$ 作用叠加可知荷载位于 k 号梁轴上,任意 i 号主梁分担的荷载计算公式为

$$R_{i,k} = R'_{i,k} + R''_{i,k} = \frac{I_{e,i}}{\sum_{i=1}^n I_{e,i}} + \frac{a_i a_k I_{e,i}}{\sum_{i=1}^n a_i^2 I_{e,i}} \quad (5)$$

式中 $R_{i,k}$ 为单位荷载位于 k 号梁轴上,任意 i 号主梁荷载横向分布反力影响线。

3.2 修正偏心压力法

由于偏心压力法假定横隔梁绝对刚性,忽略了主梁的扭转效应,往往会导致边梁计算结果偏大。为了使荷载横向分布系数计算更符合实际,可以对偏心压力法进行修正,即将式(5)考虑抗扭修正系数 β ,以计入主梁扭转刚度的影响。

$$\beta = \frac{1}{1 + \frac{G_s l^2}{12 E_s} \sum_{i=1}^n I_{T,i} / \sum_{i=1}^n a_i^2 I_i} \quad (6)$$

式中 n 为主梁的片数, I_i 为 i 号主梁的抗弯惯性矩, $I_{T,i}$ 为 i 号主梁的抗扭惯性矩。

则根据式(5,6),可求得荷载位于 k 号梁轴上,任意 i 号主梁分担的荷载值为

$$R_{i,k} = R'_{i,k} + R''_{i,k} = \frac{I_{e,i}}{\sum_{i=1}^n I_{e,i}} + \beta \frac{a_i a_k I_{e,i}}{\sum_{i=1}^n a_i^2 I_{e,i}} \quad (7)$$

3.3 考虑剪切变形及滑移效应的刚接梁法

对于波形钢腹板工字钢组合梁桥而言,各主梁

桥面板可看成一个整体,因此,根据力的平衡条件和变形协同条件,并在各主梁之间引入冗余弯矩的影响,即可根据刚接梁法求解各主梁的横向分布系数。基于力法原理,将各主梁中间顶板切开考虑,节点处代之以竖向剪力和弯矩为赘余力,如图2所示,建立相应的力法方程,即

$$\delta_{ij} \mathbf{X}_i + \Delta_{iP_j} = 0 \quad (i, j = 1, 2, \dots, 2(n-1)) \quad (8)$$

式中 δ_{ij} 为柔度系数矩阵, \mathbf{X}_i 为赘余竖向剪力和弯矩矩阵, Δ_{iP_j} 为荷载引起的位移矩阵。

根据图2所示的力平衡和变形协调关系,式(8)柔度系数矩阵中的各柔度系数计算公式为

$$\begin{aligned} \delta_{ii} &= f_{i+1}^L + f_i^R + \varphi_{i+1}^L b_{i+1}^L + \varphi_i^R b_i^R + \omega_{i+1} + \omega_i \\ \delta_{i+n-1, i+n-1} &= \varphi_{i+1}^L / b_{i+1}^L + \varphi_i^R / b_i^R + \theta_{i+1}^L + \theta_i^R \\ &\quad (i = 1, 2, \dots, n-1) \quad (9) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \delta_{i+n-1, i} &= \delta_{i, i+n-1} = \nu_i^R - \nu_{i+1}^L + \varphi_i^R - \varphi_{i+1}^L \\ \delta_{i+n-1, i+n} &= \delta_{i+n, i+n-1} = -\varphi_{i+1}^R / b_{i+1}^R = -\varphi_{i+1}^L / b_{i+1}^L \\ \delta_{i+1, i} &= \delta_{i, i+1} = -\omega_{i+1} + \varphi_{i+1}^L b_{i+1}^L = -\omega_{i+1} + \varphi_{i+1}^R b_{i+1}^R \\ \delta_{i+n-1, i+1} &= \delta_{i+1, i+n-1} = -\varphi_{i+1}^R \\ \delta_{i+n, i} &= \delta_{i, i+n} = \varphi_{i+1}^L \\ \delta_{i+n, i+1} &= \delta_{i+1, i+n} = \nu_i^R - \nu_{i+1}^L + \varphi_i^R - \varphi_{i+1}^L \\ &\quad (i = 1, 2, \dots, n-2) \quad (10) \end{aligned}$$

式中 ω_i 和 φ_i^k 分别为单位荷载作用下各主梁跨中挠度和扭转角, f_i^k 和 ν_i^k 分别为单位剪力作用混凝土桥面板端部挠度和转角, θ_i^k 为单位力偶作用下混凝土桥面板悬臂端转角, k 为各主梁左端和右端

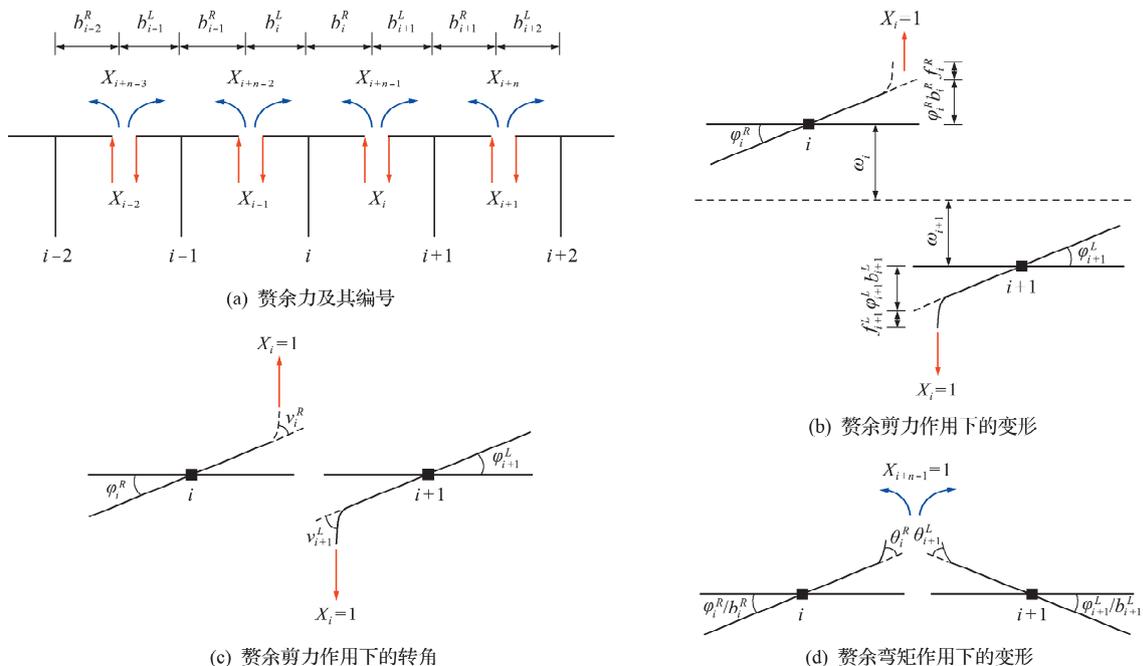


图2 刚接梁法主梁竖向变形及转角

Fig. 2 Vertical deformation and corner of main girder using rigid-connected beam method

的代号, $k=L,R$ 。

j 为外荷载 P 作用节点号, 则有

$$\begin{aligned} \Delta_{iP_j} &= -\omega_i \quad (i=j; j=1,2,\dots,n-1) \\ \Delta_{iP_j} &= \omega_i \quad (i=j-1; j=2,\dots,n-1) \quad (11) \\ \text{其余} \quad &(\Delta_{(i+n-1)P_j} = 0) \end{aligned}$$

4 横向分布系数计算方法适用性验证

4.1 工程概况

为探明上述 3 种荷载横向分布计算方法对波形钢腹板工字钢组合梁桥的适用性, 本文以某 $3\text{ m} \times 30\text{ m}$ 波形钢腹板工字钢组合梁桥为例进行计算对比分析。如图 3 所示, 桥宽为 16.25 m , 横断面由 4 片主梁组成, 梁高为 1.70 m , 其中波形钢腹板工字钢高度为 1.35 m , 主梁间距 4.10 m , 宽跨比为 0.54 。支点截面采用与钢梁齐高的端横梁, 跨中横隔板采用高度为 0.5 m 的工字钢, 横隔板间距为 8 m 。波形钢腹板采用 1000 型, 钢梁部分采用 Q345 钢, 桥面板采用 C50 混凝土, 剪力钉采用 $\Phi 22$ 圆柱焊钉, 材质为 ML15。

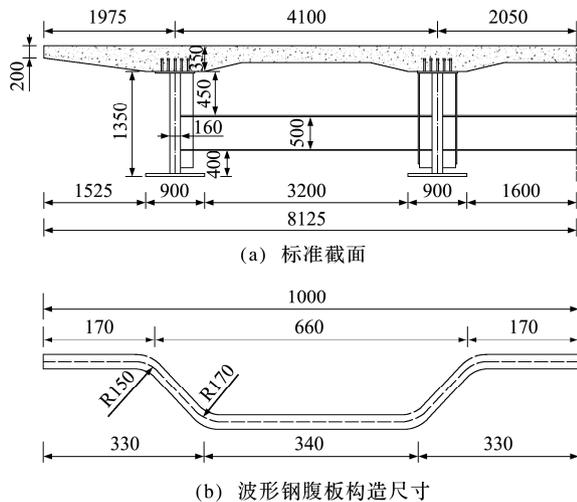


图 3 主梁截面构造(单位: mm)

4.2 有限元模型

采用有限元软件 ABAQUS 建立实桥三维有限元模型, 如图 4 所示。混凝土及焊钉采用 3D 实体单元模拟, 波形钢腹板及横隔板采用 2D 壳单元模拟, 钢筋采用 1D 线单元模拟。混凝土采用塑性损伤本构模型, 钢材采用理想弹塑性模型, 桥面板与钢梁界面设置法向硬接触。

在跨中采用 4 辆 385 kN 的车辆荷载(前轴 77 kN , 中轴及后轴均为 154 kN)进行模拟, 加载工况包括对称加载及偏心加载 2 种, 如图 5 所示。

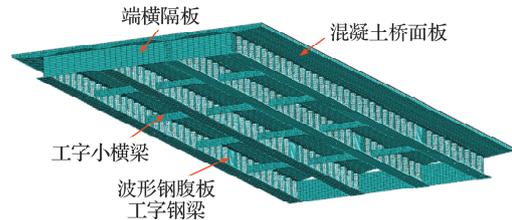


图 4 有限元模型
Fig. 5 Finite element model

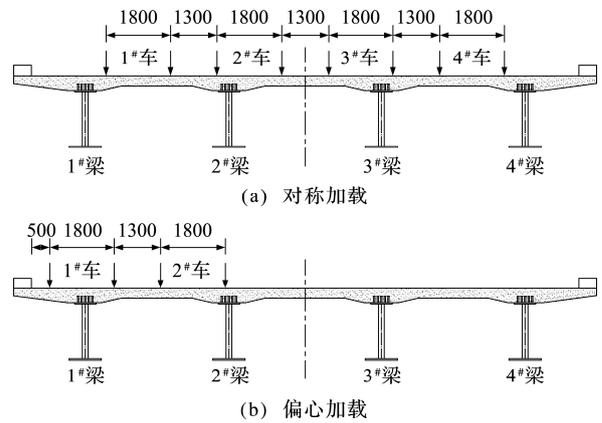


图 5 加载工况(单位: mm)
Fig. 6 Loading condition (unit: mm)

4.3 计算结果对比

根据 4.2 节工况下波形钢腹板工字钢组合梁桥的加载情况, 同时采用本文推导的考虑波形钢腹板剪切变形及钢混滑移效应的偏心压力法、修正偏心压力法及刚接梁法分别计算桥跨中截面各主梁的荷载横向分布系数, 并与有限元计算结果进行对比, 结果列入表 1。

表 1 不同方法计算的跨中荷载横向分布系数
Tab. 1 Load transverse distribution coefficients of mid-span loads calculated by different methods

荷载 工况	主梁 编号	偏心 压力法	修正 偏心 压力法	刚接梁法		有限 元法
				忽略剪切 变形及 滑移效应	考虑剪切 变形及 滑移效应	
工况 1	1#	1.001	0.995	0.923	0.952	0.946
	2#	0.999	1.005	1.082	1.057	1.064
工况 2	1#	1.182	1.114	0.974	0.937	0.943
	2#	0.743	0.713	0.662	0.626	0.634

由表 1 可知, 在工况 1 对称荷载作用下, 三种计算方法得出的荷载横向分布系数相差不大, 计算结果与有限元均符合较好。但在工况 2 偏载作用下, 采用偏心压力法和修正偏心压力法计算得到的横向荷载分布系数中, 1# 梁达到了 1.182 , 明显偏大, 主要是由于该桥宽跨比为 0.54 , 大于 0.5 , 不属于窄桥范围。因此, 对于宽跨比大于 0.5 m 的波

形钢腹板工字钢组合梁桥而言,不宜采用偏心压力法或者修正偏心压力法进行计算,而采用本文提出的考虑波形钢腹板剪切变形和钢混滑移的刚接梁法得到的荷载横向分布系数与有限元分析结果符合较好,可较为准确反映各主梁荷载分配情况。

由于刚接梁计算较为复杂,不便于工程计算,表 2 给出了不同宽跨比下,波形钢腹板工字钢组合

梁桥采用修正偏心压力法计算出的荷载横向分布系数与有限元分析对比结果。由表 2 可知,当桥梁宽跨比大于 2 时,采用本文推导的考虑剪切变形及滑移效应的修正偏心压力法计算结果与有限元结果吻合较好,误差在 5% 以内,即当结构符合窄桥条件时,波形钢腹板工字钢组合梁桥荷载横向分布系数可采用较为简洁的修正偏心压力法进行计算。

表 2 不同宽跨比修正偏心压力法和有限元法的荷载横向分布系数对比

Tab. 2 Comparison of load transverse distribution coefficients between modified eccentric pressure method and finite element method under different width-span ratios

荷载 工况	主梁 编号	跨宽比 1.85		跨宽比 2.0		跨宽比 2.5		跨宽比 3.0	
		修正偏心压力法	有限元	修正偏心压力法	有限元	修正偏心压力法	有限元	修正偏心压力法	有限元
工况 1	1#	0.995	0.946	0.999	0.977	0.998	0.992	0.998	0.995
	2#	1.005	1.064	1.001	1.034	1.002	1.012	1.002	1.014
工况 2	1#	1.112	0.943	0.952	0.886	0.845	0.823	0.782	0.756
	2#	0.714	0.634	0.653	0.604	0.603	0.584	0.583	0.564

5 横隔板对跨中荷载横向分布系数的影响

为探明横隔板数量及横隔板刚度对多梁式波形钢腹板工字钢组合梁桥荷载横向分布系数的影响,本文采用 4.2 节的有限元模型进行参数分析,按半波正弦曲线沿桥跨方向进行加载,沿横向桥分别计算图 6 所示 9 个加载点作用结果,按各主梁跨中挠度比例计算每片主梁的荷载横向分布系数影响线。最后按影响线结果进行车道最不利布载,计算 3 车道作用下各主梁的荷载横向分布系数。

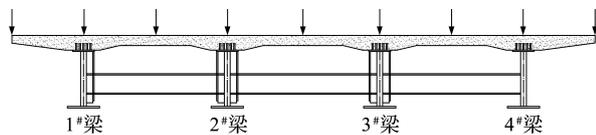


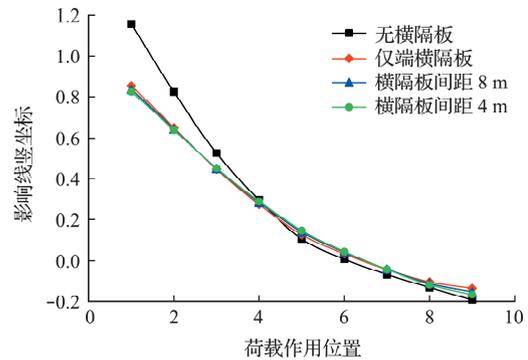
图 6 荷载沿横桥向施加位置

Fig. 6 Load application position along the transverse bridge direction

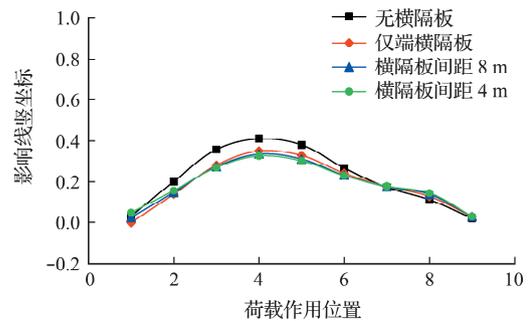
5.1 横隔板数量的影响

建立无横隔板、仅设置端横隔板和横隔板间距为 8 m, 4 m 共 4 组模型,图 7 给出了各主梁跨中荷载横向分布影响线,根据截面对称原则,只给出 1# 和 2# 主梁计算结果。可以看出,不同横隔板布置下主梁荷载横向分布系数变化规律相似,无横隔板时各主梁影响线曲率较大,1# 边主梁影响线竖坐标最大值比仅设置端横隔板高出 35.9%, 2# 中主梁影响线竖坐标最大值比仅设置端横隔板高出

17.2%, 而横隔板数量对各主梁荷载横向分布影响较小。



(a) 1# 梁



(b) 2# 梁

图 7 不同横隔板数量下各主梁跨中荷载横向分布影响线

Fig. 7 Influence line of load transverse distribution in mid-span of each main beam under different numbers of diaphragms

表 3 给出了最不利影响下布置 3 车道荷载作用下各主梁的荷载横向分布系数。由表 3 可知,无横隔板时,1# 边主梁荷载横向分布系数比 2# 中主梁高出 16%; 设置横隔板后,各主梁荷载横向分布系数均比无横隔板时有所降低,1# 边主梁分担荷

载比例降低约 16%，2# 中主梁分担荷载比例降低约 20%；随着跨间小横梁数量的增加，1# 边主梁荷载横向分布系数逐渐增大，但增长幅度较小，2# 中主梁荷载横向分布系数随小横梁数量增加而减小，减小程度也较为微弱，即横隔板间距对各主梁荷载横向分布系数影响较小。实桥设计时，可在端部及跨中位置布置横隔板，其余位置可根据结构稳定性要求进行布置。

表 3 不同横隔板数量下跨中荷载横向分布系数
Tab. 3 Load transverse distribution coefficients of mid-span loads with different numbers of diaphragms

主梁编号	无横隔板	仅端横隔板	横隔板间距 8 m	横隔板间距 4 m
1#	1.08	0.93	0.94	0.94
2#	0.93	0.77	0.75	0.75

5.2 横隔板刚度的影响

以横隔板间距为 8 m 为例，进一步分析横隔板刚度对多梁式波形钢腹板工字钢组合梁桥荷载横向分布系数的影响。通过改变小横梁腹板厚度来反映横隔板刚度，分别选择横隔板厚度为 10 mm、15 mm 和 20 mm 进行对比分析，各主梁荷载横向分布影响线及荷载横向分布系数如图 8 和表 4 所示，结果表明，随着横隔板厚度增加，1# 边主梁分担荷

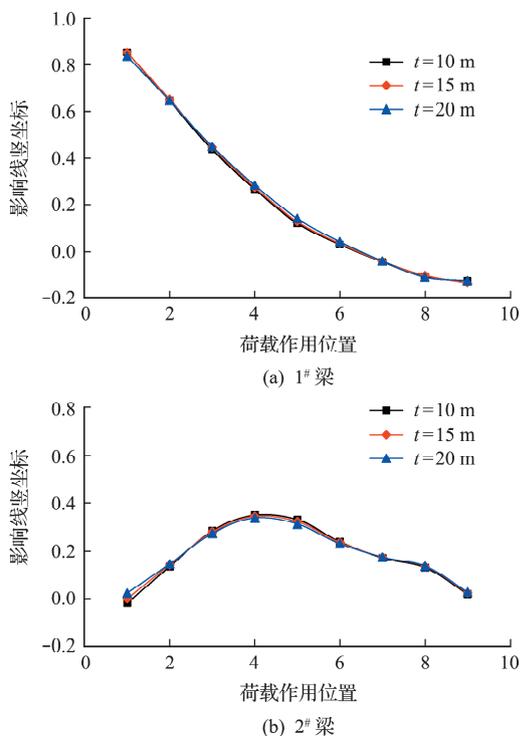


图 8 不同横隔板厚度下各主梁跨中荷载横向分布影响线
Fig. 8 Influence line of load transverse distribution in mid-span of each main beam under different diaphragm thicknesses

表 4 不同横隔板厚度下跨中荷载横向分布系数
Tab. 4 Load transverse distribution coefficients of mid-span loads under different diaphragm thicknesses

主梁编号	$t=10$ mm	$t=15$ mm	$t=20$ mm
1#	0.91	0.93	0.94
2#	0.76	0.76	0.75

载比例逐渐增加，2# 中主梁分担荷载比例逐渐减小，但变化幅度均较小，即横隔板刚度对波形钢腹板工字钢组合梁荷载横向分布系数影响较小，实桥横隔板刚度设计按稳定性要求计算即可。

6 结论

本文考虑剪切变形及滑移效应影响，推导了 3 种多梁式波形钢腹板工字钢组合梁桥荷载横向分布系数计算方法，包括偏心压力法、修正偏心压力法及刚接梁法；并以某 3 m × 30 m 波形钢腹板工字钢组合梁桥为例，结合有限元分析，探讨了各计算方法的适用性；最后利用有限元模型进一步研究了横隔板数量及刚度对主梁荷载横向分布系数的影响。主要结论如下。

(1) 采用考虑剪切变形及滑移效应的刚接梁法计算的荷载横向分布系数与有限元结果符合较好，可较为准确反映各主梁荷载分配情况。

(2) 当桥梁宽跨比大于 2 时，波形钢腹板工字钢组合梁桥荷载横向分布系数可采用较为简洁的修正偏心压力法进行计算。

(3) 横隔板设置可有效改善各主梁荷载横向分布系数，但横隔板数量对各主梁分担荷载比例影响较小，实桥设计时可在端部及跨中位置布置横隔板，其余位置可根据结构稳定性要求进行布置。

(4) 横隔板刚度对各主梁荷载横向分布系数影响较小，实桥横隔板刚度设计按稳定性要求计算即可。

参考文献 (References):

- [1] 许晶, 郑智仁, 孔华辉, 等. 考虑界面滑移效应的波形钢腹板箱梁解析解[J]. 建筑科学与工程学报, 2022, 39(6): 8. (XU Jing, ZHENG Zhi-ren, KONG Hua-hui, et al. Analytical solutions for box-girder with corrugated steel webs considering interface slip effect[J]. *Journal of Architecture and Civil Engineering*, 2022, 39(6): 8.)
- [2] 鲁宁宁, 刘世忠, 毛亚娜, 等. 考虑梗腋影响的波形钢

- 腹板组合箱梁剪力滞效应研究[J]. 计算力学学报, 2022, **40**(4): 614-620. (LU Ning-ning, LIU Shi-zhong, MAO Ya-na, et al. Shear lag effect theory and parameter analysis of composite box girder with corrugated steel webs considering the influence of haunch [J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2022, **40**(4): 614-620. (in Chinese))
- [3] Wang S H, Zhang Y, Luo T Y, et al. Elastic critical shear buckling stress of large-scale corrugated steel web used in bridge girders [J]. *Engineering Structures*, 2021, **244**: 112757.
- [4] 赵品, 荣学亮, 叶见曙, 等. 波形钢腹板箱梁的腹板受力性能及桥面板横向内力分析[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2021, **42**(3): 367-372. (ZHAO Pin, RONG Xue-liang, YE Jian-shu, et al. Analysis on mechanical property of web and transverse internal force in bridge deck of box girder with corrugated steel webs [J]. *Journal of Jiangsu University* (Natural Science Edition), 2021, **42**(3): 367-372. (in Chinese))
- [5] 张紫辰, 王根会, 樊江. 波形钢腹板组合工字梁的振动特性[J]. 振动与冲击, 2022, **41**(8): 297-303. (ZHANG Zi-chen, WANG Gen-hui, FAN Jiang. Vibration characteristics of composite I-beam with corrugated steel webs [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2022, **41**(8): 297-303. (in Chinese))
- [6] Abendroth R E, Klaiber F W, Shafer M W. Diaphragm effectiveness in prestressed-concrete girder bridges [J]. *Journal of Structural Engineering*, 1995, **121**(9): 1362-1369.
- [7] Mohseni I, Rashid A K A, Kang J. Effect of intermediate diaphragm on lateral load distribution factor of multicell box-girder bridges [J]. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2014, **18**(7): 2128-2137.
- [8] Zhao Y, Cao X Z, Zhou Y J, et al. Lateral load distribution for hollow slab bridge: Field test investigation [J]. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 2020, **14**(1): 22. (in Chinese))
- [9] 倪章军, 范立础, 李建中, 等. 新型 GFRP 组合梁桥荷载横向分布系数计算[J]. 桥梁建设, 2007, **37**(2): 51-54. (NI Zhang-jun, FAN Li-chu, LI Jian-zhong, et al. Calculation of load transverse distribution factors of new type of GFRP composite beam bridge [J]. *Bridge Construction*, 2007, **37**(2): 51-54. (in Chinese))
- [10] 刘华, 叶见曙, 俞博, 等. 桥梁荷载横向分布系数计算方法[J]. 交通运输工程学报, 2009, **9**(1): 62-66. (LIU Hua, YE Jian-shu, YU Bo, et al. Calculation method of transversal distribution factor for bridge load [J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2009, **9**(1): 62-66. (in Chinese))
- [11] 聂鑫, 樊健生, 付裕. 箱形截面连续组合梁桥的荷载横向分布[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2009, **49**(12): 1930-1933. (NIE Xin, FAN Jian-sheng, FU Yu. Transverse load distribution on box section continuous composite steel-concrete bridges [J]. *Journal of Tsinghua University* (Science and Technology), 2009, **49**(12): 1930-1933. (in Chinese))
- [12] 马磊, 万水, 蒋正文, 等. 单箱多室波形钢腹板箱梁荷载横向分布[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2014, **44**(1): 145-149. (MA Lei, WAN Shui, JIANG Zheng-wen, et al. Load transverse distribution of single box multi-cell girder with corrugated steel webs [J]. *Journal of Southeast University* (Natural Science Edition), 2014, **44**(1): 145-149. (in Chinese))
- [13] 战家旺, 高胜星, 闫宇智, 等. 基于模型修正的公路简支板梁桥荷载横向分布系数计算方法[J]. 中国公路学报, 2019, **32**(5): 72-79. (ZHAN Jia-wang, GAO Sheng-xing, YAN Yu-zhi, et al. A calculation method for transverse load distribution coefficient of highway simply-supported slab-girder bridges based on model updating [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2019, **32**(5): 72-79. (in Chinese))
- [14] 李院军, 邹晓光, 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. (LI Yuan-jun, WU Xiaoguang, HUANG Cheng, et al. Calculation of transverse load distribution coefficient of assembled girder bridge considering main girder damage [J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2019, **16**(6): 1459-1465. (in Chinese))
- [15] 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. (MA Chi, LIU Shi-zhong. Calculation of load transverse distribution coefficient of multi-beam improved composite small box girder bridge with corrugated steel webs considering shear deformation [J]. *Journal of South China University of Technology* (Natural Science Edition), 2020, **48**(7): 104-114. (in Chinese))
- [16] 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. (LI Li-feng, CHENG Zi-han, FENG Wei, 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. (in Chinese))

Study on the load transverse distribution coefficient of multi-beam composite I-beam with corrugated steel webs

WU Chuan-shan¹, DENG Wen-qin^{*2}, ZHANG Huan-tao¹,
ZHA Shang², ZHANG Jian-dong^{2,3}

(1. Shandong High Speed Jiqing Middle Line Highway Co.,Ltd.,Weifang 261516,China;

2. College of Civil Engineering ,Nanjing Tech University,Nanjing 211816,China;

3. Jiangsu Transportation Research Institute,Nanjing 211112,China)

Abstract: In order to explore the calculation method of the load transverse load distribution coefficient of a multi-beam composite I-beam with corrugated steel web, the traditional eccentric pressure method, modified eccentric pressure method and rigid-connected beam method are modified by considering the torsional stiffness, shear deformation and steel-mixed slip effect of the corrugated steel webs. Combined with the finite element model, the applicability of the above methods are compared and analyzed through a typical composite four-beam bridge with corrugated steel webs. Then, the influence of the number and stiffness of the diaphragm on its transverse load distribution coefficient is studied based on the parametric analysis. The results show that the transverse load distribution coefficient obtained by the rigid-connected beam method considering shear deformation and slip effect is in the best agreement with the finite element value. When the width-span ratio of the bridge is less than 2, the rigid-connected beam method should be used to calculate the transverse load distribution coefficient of each main beam, when the width-span ratio is greater than 2, the more concise modified eccentric pressure method should be used for calculation. The installation of diaphragms can improve the transverse load uniform distribution of each main beam, but the spacing and stiffness of the diaphragms between spans have little effect on the transverse load distribution coefficient. In the design of a real bridge, the diaphragms can be arranged at the end and mid-span positions, and the rigidity of the diaphragms and the number of diaphragms in the remaining parts can be arranged according to the requirements of structural stability.

Key words: steel-concrete composite beam; I-beam with corrugated steel webs; load transverse distribution coefficient; shear deformation; slip effect; diaphragm