

DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2022021924021961

文章编号: 1674-599X(2024)01-0052-08

引用格式: 颜东煌, 刘鹏, 陈星烨. 腹板对扁平多室箱梁抗扭性能的优化分析[J]. 交通科学与工程, 2024, 40(1): 52-59.

Citation: YAN Donghuang, LIU Peng, CHEN Xingye. Optimal analysis of torsional performance of flat multi-cell thin-walled box girder by web [J]. J. Transp. Sci. Eng., 2024, 40(1): 52-59.

腹板对扁平多室箱梁抗扭性能的优化分析

颜东煌, 刘鹏, 陈星烨

(长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410114)

摘要: 为分析偏载作用下腹板参数对扁平多室箱梁抗扭性能的影响, 以临海市临海大桥主梁为工程背景, 利用 ANSYS 有限元软件分别建立不同截面形式的扁平多室箱梁有限元模型, 研究在偏载作用下, 扁平多室箱梁在不同中腹板间距和中腹板厚度下截面竖向位移与扭转畸变角的变化规律, 并评估不同截面形式对箱梁抗扭性能的影响。研究表明: 在偏载作用下, 带有横隔板的箱梁以产生截面整体扭转为主; 腹板参数对箱梁抗扭性能有较大影响, 合理调节中腹板间距和厚度均可提高箱梁抗扭刚度。中腹板间距 $d=10.0$ m 的箱梁截面抗扭刚度较 $d=0.0$ m 的提升了 15.7%; 中腹板厚度 $t_3=0.0$ m 的箱梁截面抗扭刚度较 $t_3=0.60$ m 的提升 38.2%。同时, 腹板数量的增加可以改善箱梁的抗弯性能, 提高箱梁顶底板之间的联系, 从而提升箱梁整体稳定性。该结论可为类似箱梁截面设计提供理论参考。

关键词: 腹板; 扁平多室箱梁; 偏载; 扭转畸变; 抗扭性能

中图分类号: U448.27

文献标志码: A

Optimal analysis of torsional performance of flat multi-cell thin-walled box girder by web

YAN Donghuang, LIU Peng, CHEN Xingye

(School of Civil Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: In order to analyze the influence of web parameters on the torsional performance of flat multi-chamber box girder with partial load, Taking the main beam of the Linhai Bridge in Linhai City as the engineering background, the finite element model of flat multi-chamber box girder with different section forms was established using ANSYS to study the vertical displacement and torsional distortion angle of flat multi-chamber box girder with different mid-web spacing and mid-web thickness under partial load. The influence of different section forms on the torsional performance of the box girder was also evaluated. The results show that, the overall torsion of section is mainly caused by box girder with transverse diaphragm under partial load. The torsional performance of box girder is impacted significantly by the web parameters. The torsional stiffness of the box girder can be improved by the reasonable adjustment of the spacing and thickness of the web. When the middle web spacing d is 10.0m, the torsion stiffness of the box girder section is increased by 15.7% compared with that of 0.0m. When the middle web thickness t_3 is 0.0m, the torsion stiffness of the box girder section is

收稿日期: 2022-02-19

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51878073)

作者简介: 颜东煌 (1961—), 男, 长沙理工大学教授, 博士生导师。E-mail: yandonghuang@126.com

38.2% higher than that of 0.60m. Furthermore, the increase of the number of web can improve the bending performance of the box girder, improving the connection between the top and bottom of the box girder. and the overall stability of the box girder is improved. This conclusion can provide theoretical reference for similar box girder section design.

Key words: web; flat multi-chamber box girder; eccentric load; torsional distortion; torsional resistance

薄壁箱梁由于自重小、刚度大、结构性能好等优势,在现代工程建设中得到广泛应用。但是,随着交通量的增长,桥梁易产生偏载,严重偏心超载将导致桥梁变形,甚至发生倾覆事故。在偏载作用下,薄壁箱梁的变形有纵向弯曲、刚性扭转、畸变和横向弯曲等^[1-3],其中,箱梁的扭转刚度对于整个截面的承载特性和合理设计都非常重要。扁平箱梁一般为多室、宽高比大,其截面结构似板非板、似梁非梁,因此,研究其在偏心荷载作用下的受力特性十分必要。李宏江等^[4-5]系统介绍了箱梁扭转与畸变效应的计算理论,列举了影响箱梁扭转和畸变的因素。牛金龙等^[6-7]针对薄壁钢箱梁自由、翘曲扭转刚度和单箱单室箱梁截面的扭转刚度等进行了研究。郭靖宇等^[8]基于静力学平衡方程、几何方程和本构方程,建立了箱形梁在扭矩作用下以扭转角和翘曲程度为变量的微分方程组。吕毅刚等^[9]基于力学原理,提出了箱梁桥抗倾覆稳定系数的简易计算方法。马俊军等^[10]考虑悬臂板对约束扭转的贡献,通过梁理论的扭转分析对箱梁约束扭转的计算公式进行了修正。颜东煌等^[11-12]研究主梁强扭损伤后的受力性能,利用节段模型试验模拟桥梁受损扭伤过程,提出了有效增大受扭损伤箱梁抗扭刚度的方法。祝明桥等^[13]基于钢纤维高强混凝土薄壁箱梁的纯扭进行试验研究,得到了线扭转角与畸变角在构件受力过程中沿跨度方向的变化规律。周资斌等^[14]基于公路箱形截面梁抗扭塑性抵抗矩计算公式,提出了箱梁截面抗剪扭强度优化方法。CHIDOLUE等^[15-16]分析了不同截面形状下薄壁箱梁结构弯扭变形行为和不同顶板厚度对薄壁梯形箱梁扭转效应的影响。叶益军等^[17]通过建立不同箱室数量和宽跨比的单箱多室宽箱梁的有限元模型,分析了宽箱梁在扭转荷载和偏心荷载作用下的抗扭性能。刘虹延等^[18]以江门市潮荷西江大桥为背景,分析了腹板数量对单索面斜拉桥成桥状态下不同位置的箱梁抗扭性能的影响。樊新星^[19]以某大跨斜拉桥为研究对象,分析了斜拉桥主梁的主要结

构参数变化对主梁线形以及抗扭刚度的影响。曹旭等^[20]通过拟定横隔板数量与宽厚尺寸,研究了不同宽跨比对箱梁扭转性能的影响。

在这些研究中,扁平多室箱梁腹板参数对其抗扭性能影响的研究少见。因此,本研究拟以临海市临海大桥主梁为工程背景,建立板壳有限元模型,分析中腹板不同间距和厚度的扁平多室薄壁箱梁在偏心荷载作用下的竖向位移与扭转角,研究不同的箱室截面形式对箱梁抗扭性能的影响,寻求各箱室截面合理布置方式,以期类似薄壁箱梁扭转性能的研究提供参考。

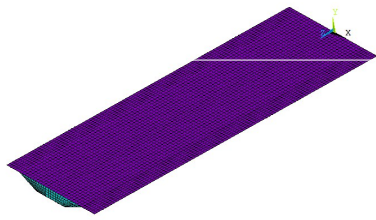
1 计算模型的建立

1.1 工程概况

临海市临海大桥为独塔单索面预应力混凝土斜拉桥,主梁截面形式为单箱三室,考虑到悬臂梁固端约束对自由端的影响,宽跨比不宜大于0.5,且主梁采用挂篮悬浇施工,施工过程中主梁最大伸臂长度为102.0 m,故取主梁长度 L 为100.0 m进行分析。利用ANSYS有限元软件进行计算^[21]。采用shell63单元建立多个悬臂箱梁模型,横隔板间距为5.0 m,厚度为0.3 m,模型边界条件为一端固结,一端自由,工程背景及有限元模型如图1所示。在箱梁质量不变的前提下,研究中腹板间距 d 和腹板厚度 t_3 、 t_4 对箱梁截面抗扭刚度的影响,分别取中腹板间距为0、 $1/3L_1$ 、 $2/3L_1$ 和 L_1 (L_1 为底板宽度)进行分析,即 d 分别为0.0、3.4、6.8和10.0 m。考虑中腹板厚度不宜过大,故在箱梁截面初始中腹板间距 d 为3.4 m时,取腹板厚度分别为 $t_3=0.600$ m, $t_4=0.132$ m; $t_3=0.400$ m, $t_4=0.220$ m; $t_3=0.200$ m, $t_4=0.308$ m; $t_3=0.000$ m, $t_4=0.396$ m。其主梁截面具体尺寸如图2所示。偏心荷载为施加于悬臂端部箱梁外侧腹板上的均布荷载,荷载大小为10 kN/m,布载整个悬臂端,只考虑荷载作用,不考虑箱梁自重。箱梁扭转荷载的加载方式如图3所示。



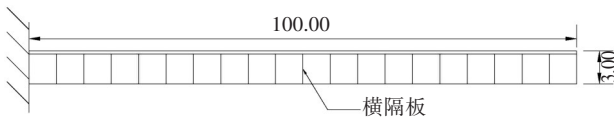
(a) 临海大桥



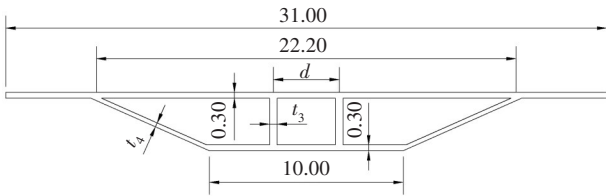
(b) 有限元计算模型

图1 工程背景及有限元模型

Fig. 1 Engineering background and finite element model diagram



(a) 立面图



(b) 横断面

图2 截面尺寸(单位:m)

Fig. 2 Section size (Unit: m)



图3 荷载加载示意

Fig. 3 Load loading diagram

1.2 箱梁截面特性计算

1.2.1 箱梁质量表达式

腹板对箱梁抗扭性能的影响是在拟定箱梁质量不变的前提下进行的,故设箱梁质量表达式为:

$$W = \sum_{i=1}^n B_i t_i L \quad (1)$$

式中: B_i 为各板件宽度; t_i 为各板件厚度; L 为桥梁跨长。

由式(1)可知,在桥梁跨长、横隔板的间距与厚度不变的情况下,箱梁横截面面积保持不变,则箱梁的总质量不变。

1.2.2 箱梁抗扭刚度及抗弯刚度计算

箱梁的抗扭和抗弯性能主要依据于抗扭刚度与抗弯刚度的变化,采用文献[22]中的抗扭刚度计算方法,得到单箱多室箱型截面抗扭刚度。

$$k_{ii}\psi_i + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n k_{ij}\psi_j = 2A_i \quad (2)$$

$$k_{ii} = \oint_{s_i} \frac{ds}{t_i} \quad k_{ij} = -\oint_{s_j} \frac{ds}{t_{ij}} \quad (3)$$

$$\psi_i = \frac{f_B}{G\varphi'_i} \quad (4)$$

$$J = 2 \sum_{i=1}^n A_i \psi_i \quad (5)$$

式中: f_B 为剪力流; k_i 为沿第 i 室的周线积分; k_{ij} 为第 i 与第 j 室的公共壁积分; ψ_i 为各闭室的扭转函数; t_{ij} 为第 i 与第 j 室的公共壁厚; G 为剪切模量, $G=E/2(1+\nu)$; ν 为泊松比; φ'_i 为各箱室扭率; A_i 为各箱室壁厚中心线围成的面积; t_i 为箱梁各板件厚度; J 为箱梁抗扭惯性矩。

采用文献[2]中的抗弯惯性矩计算方法,得到薄壁箱梁的抗弯惯性矩,继而求得抗弯刚度,计算式为:

$$\begin{aligned} I = \int_A x^2 dA = & \frac{1}{12} b_1^3 t_1 + \frac{1}{12} b_2^3 t_2 + \\ & 2 \times \sum_{i=1}^{n-2} \left(\frac{1}{12} h t_3^3 + h t_3 \frac{d^2}{4} \right) + \\ & 2 \times \left[\frac{1}{12} h_x t_4^3 + h_x t_4 \frac{(b_1 + b_2)^2}{4} \right] + \\ & 2 \times \left[\frac{1}{12} b_3^3 t_1 + b_3 t_1 \left(\frac{b_1 + b_3}{2} \right)^2 \right] \end{aligned} \quad (6)$$

式中: b_1 、 b_2 、 b_3 分别为顶板、底板及翼缘板宽度; t_1 、 t_2 、 t_3 、 t_4 分别为顶板、底板、中腹板、外腹板厚度; h 为中腹板长度; h_x 为斜腹板长度; I 为箱梁在 xoy 平面内弯曲时断面绕 x 轴的惯性矩,其中, x 为坐标系水平轴,

y 为竖向轴; d 为中腹板间的间距。

1.2.3 截面特性计算值及增大系数

考虑不同腹板间距及厚度的截面,通过理论计算得到其抗扭刚度和抗弯刚度。以中腹板间距 $d=0.0\text{ m}$ 和中腹板厚度 $t_3=0.60\text{ m}$ 时的截面为基准,通过增大系数的数值对比反应截面抗扭刚度及抗弯刚度的变化,增大系数 α, β 定义如下:

$$\alpha = \frac{S_{GJ,i}}{S_{GJ,j}} \quad (i \neq j) \quad (7)$$

$$\beta = \frac{S_{EI,i}}{S_{EI,j}} \quad (i \neq j) \quad (8)$$

式中: S_{GJ} 为截面抗扭刚度; S_{EI} 为抗弯刚度; α 为箱梁参数变化下不同截面与基准截面抗扭刚度的比值; β 为箱梁参数变化下不同截面与基准截面抗弯刚度的比值。

表 1 主要反映改变中腹板间距导致截面特性数值及增大系数的变化情况,表 2 主要反映改变中腹板厚度导致截面特性数值及增大系数的变化情况,表中各截面的抗扭刚度及抗弯刚度数值由式 (5)~(6) 计算所得。

表 1 不同中腹板间距的截面特性

Table 1 Sectional properties of different mid-web spacings

中腹板间距 d/m	抗扭刚度 $S_{GJ}/$ ($10^{11}\text{ N}\cdot\text{m}^2$)	增大系数 α	抗弯刚度 $S_{EI}/$ ($10^{13}\text{ N}\cdot\text{m}^2$)	增大 系数 β
0.0	7.426	1.000	3.374	1.000
3.4	7.641	1.029	3.397	1.007
6.8	8.046	1.083	3.470	1.028
10.0	8.594	1.157	3.583	1.062

表 2 不同中腹板厚度的截面特性

Table 2 Sectional properties of different mid-web thicknesses

中腹板厚度 t_3/m	抗扭刚度 $S_{GJ}/$ ($10^{11}\text{ N}\cdot\text{m}^2$)	增大系数 α	抗弯刚度 $S_{EI}/$ ($10^{13}\text{ N}\cdot\text{m}^2$)	增大 系数 β
0.60	6.416	1.000	3.138	1.000
0.40	7.641	1.191	3.397	1.083
0.20	8.388	1.307	3.657	1.165
0.00	8.865	1.382	3.916	1.248

2 计算结果分析

2.1 中腹板间距对竖向位移和扭转畸变角的影响

2.1.1 中腹板间距对竖向位移的影响分析

考虑中腹板间距的变化,偏载作用下箱梁悬臂端截面顶板各节点的竖向位移,节点位置如图 4 所示,并绘制竖向位移沿横桥向的变化图,如图 5 所示。

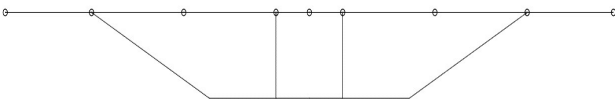


图 4 悬臂端截面顶板各节点位置

Fig. 4 The position of each node of the top plate of the cantilever end section

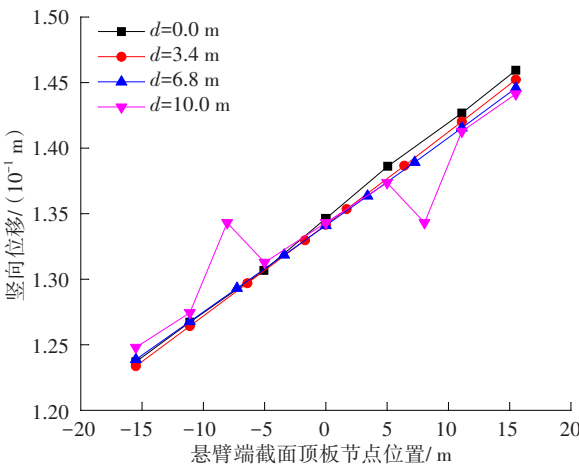


图 5 不同中腹板间距对截面竖向位移的影响

Fig. 5 Vertical displacement of section with change in mid-web spacing

从图 5 可以看出,在偏载作用下,箱梁截面竖向位移变形沿横桥向均呈线性变化。当中腹板间距 $d=0.0\text{ m}$ 时,箱梁截面为单箱双室; $d=3.4\text{ m}$ 、 6.8 m 和 10.0 m 时,箱梁截面为单箱三室。其中, $d=10.0\text{ m}$ 时,由于中腹板间距与底板宽度相等,中腹板与斜腹板形成锐角,使局部应力集中,继而箱梁悬臂端截面的竖向位移在中腹板附近发生突变,表明:中腹板的间距变化对箱梁的局部抗弯刚度具有较大影响。偏载作用下,无论箱梁截面形式如何变化,带有横隔板的箱梁还是以产生截面整体扭转为主,符合符拉索夫的刚性截面的假定。

2.1.2 中腹板间距对扭转畸变角的影响分析

选取在偏心荷载作用下与提取竖向位移位置相同节点的扭转畸变角,绘制扭转畸变角沿横桥向的变化图,如图6所示。

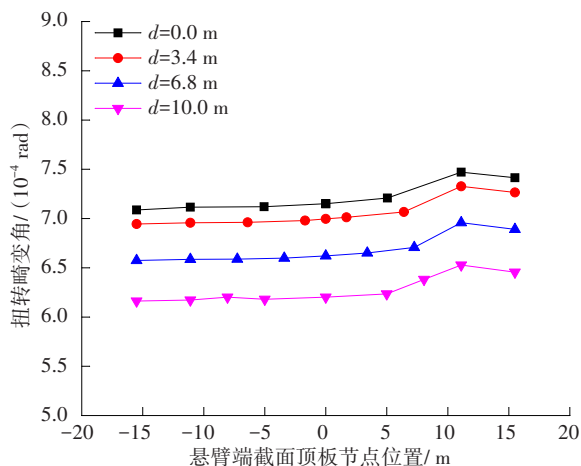


图6 不同中腹板间距对截面扭转畸变角的影响

Fig. 6 Section torsional distortion angle with variation of mid-web spacing

从图6可以看出,在偏心荷载作用下,悬臂端截面的扭转畸变角数值随着距荷载作用位置距离的增加而逐渐减小。且随着中腹板间距 d 的增加,悬臂端顶板各节点的扭转畸变角随之减小,表明:中腹板间距的增加对箱梁整体的抗扭刚度有所提升。当中腹板间距 $d=0.0$ m时,悬臂端截面顶板最大扭转畸变角为 7.471×10^{-4} rad;当 $d=10.0$ m时,悬臂端截面顶板最大扭转畸变角为 6.528×10^{-4} rad,相比 $d=0.0$ m时的扭转畸变角相差率为12.6%。表1中理论计算的截面抗扭刚度增大了15.7%,扭转畸变角相差率与抗扭刚度增大率较为接近,符合乌曼斯基薄壁杆件弯曲扭转理论。

2.2 腹板厚度对竖向位移和扭转畸变角的影响

2.2.1 腹板厚度对竖向位移的影响分析

考虑腹板厚度变化,偏载作用下箱梁悬臂端截面顶板各节点的竖向位移,绘制竖向位移沿横桥向的变化图,如图7所示:

从图7可以看出,在偏载作用下,箱梁的竖向位移变形沿横桥向近似呈线性变化。随着中腹板厚度的减小,外腹板厚度增加,当 $t_3=0.000$ m, $t_4=0.396$ m时,箱梁截面由单箱三室转变为单箱单室,4种箱室截面的竖向位移变化趋势基本一致。箱梁截面为单箱三室时,随着中腹板厚度减小,外腹板厚度

增加,箱梁截面顶板各节点竖向位移减小;表明:中腹板厚度传递给外腹板可以改善箱梁抗弯刚度。但当箱梁截面为单箱单室时,箱梁截面顶板各节点竖向位移增加,表明腹板数量的增加一定程度上可以改善箱梁的抗弯性能,提高箱梁顶底板间联系,从而提升箱梁整体稳定性。

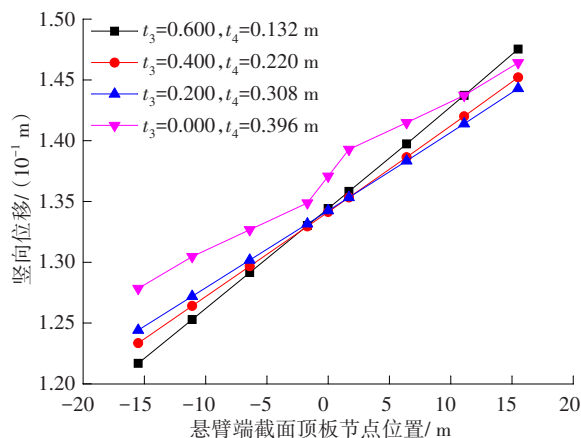


图7 不同腹板厚度对截面竖向位移的影响

Fig. 7 Sectional vertical displacement diagram for changes in web thickness

2.2.2 腹板厚度对扭转畸变角的影响分析

选取在偏心荷载作用下与提取竖向位移位置相同节点的扭转畸变角,绘制扭转畸变角沿横桥向的变化图,如图8所示。

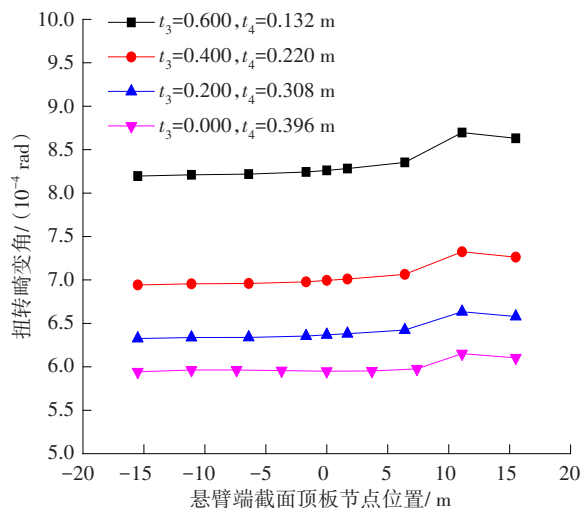


图8 腹板厚度变化的截面扭转畸变角

Fig. 8 Cross-sectional torsional distortion angle diagram for changes in web thickness

从图8可以看出,在偏心荷载作用下,随着中腹板厚度减小,外腹板厚度增加,在腹板与顶底板的

相互作用下,箱梁顶板各节点的扭转畸变角随之减小,表明:中腹板厚度的减小使箱梁整体的抗扭刚度有所提升,当 $t_3=0.600\text{ m}$, $t_4=0.132\text{ m}$ 时,悬臂端截面顶板最大扭转畸变角为 $8.697\times 10^{-4}\text{ rad}$;中腹板厚度 $t_3=0.000\text{ m}$, $t_4=0.396\text{ m}$ 时,悬臂端截面顶板最大扭转畸变角为 $6.152\times 10^{-4}\text{ rad}$,相比 $t_3=0.600\text{ m}$, $t_4=0.132\text{ m}$ 时的扭转畸变角相差率为29.3%。表2理论计算的截面抗扭刚度增大了38.2%,扭转畸变角相差率与截面抗扭刚度增大率较为接近。这表明外腹板在箱梁抗扭过程中发挥了重要作用,而中腹板对箱梁抗扭的影响较小。

3 结论

以临海市临海大桥主梁为研究背景,研究扁平多室薄壁箱梁在偏载作用下中腹板间距及厚度的变化对抗扭性能的影响,分别对比中腹板间距 $d=0.0\text{ m}$ 、 $d=3.4\text{ m}$ 、 $d=6.8\text{ m}$ 、 $d=10.0\text{ m}$ 和中腹板厚度 $t_3=0.60\text{ m}$ 、 $t_3=0.40\text{ m}$ 、 $t_3=0.20\text{ m}$ 、 $t_3=0.0\text{ m}$ 时悬臂端截面的竖向位移和扭转畸变角,得到结论:

1) 拟定箱梁质量不变,在偏载作用下,箱梁截面竖向位移及扭转畸变角变形沿横桥向均呈线性变化,说明无论箱梁截面形式如何变化,带有横隔板的箱梁还是以产生截面整体扭转为主。

2) 分析悬臂箱梁在偏心荷载作用下不同中腹板间距和腹板厚度的截面竖向位移可知,中腹板间距过大时,易出现局部效应,表明腹板对局部的抗弯性能有较大影响。其次,腹板数量的增加在一定程度上可以改善箱梁的抗弯性能,增强箱梁顶底板之间的联系,从而提升箱梁的整体稳定性。

3) 拟定箱梁质量不变,在偏载作用下,当中腹板间距 $d=10.0\text{ m}$ 时,与 $d=0.0\text{ m}$ 时相比,箱梁截面抗扭刚度增加15.7%,有限元计算得到的扭转畸变角减小12.6%;腹板厚度 $t_3=0.00\text{ m}$ 时,相比 $t_3=0.600\text{ m}$ 时,箱梁截面抗扭刚度增加38.2%,扭转畸变角减小29.3%。从中可知箱梁腹板参数对于箱梁的抗扭刚度有较大影响。

4) 在扁平多室薄壁箱梁受偏载作用的情况下,考虑 $d=10.0\text{ m}$ 时,箱梁会出现局部效应,以及中腹板对于箱梁抗弯性能具有较大贡献。基于腹板参数合理调节范围及弯扭性能综合效应,本案例得到

截面最优腹板参数为:中腹板间距 $d=6.8\text{ m}$,中腹板厚度 $t_3=0.200\text{ m}$,外腹板厚度 $t_4=0.308\text{ m}$ 。

参考文献(References):

- [1] 陈伯真,胡毓仁. 薄壁结构力学[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1998.
CHEN Baizhen, HU Yuren. Thin-walled structural mechanics [M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 1998.
- [2] 郭金琼, 房贞政, 郑振. 箱形梁设计理论[M]. 2版. 北京: 人民交通出版社, 2008.
GUO Jinqiong, FANG Zhenzheng, ZHENG Zhen. Design theory of box girder[M]. 2nd ed. Beijing: China Communications Press, 2008.
- [3] 项海帆, 等. 高等桥梁结构理论[M]. 2版. 北京: 人民交通出版社, 2013.
XIANG Haifan. Advanced theory of bridge structures [M]. 2nd ed. Beijing: China Communications Press, 2013.
- [4] 李宏江. 波形钢腹板预应力混凝土组合箱梁扭转与畸变研究进展[J]. 建筑结构学报, 2017, 38(7): 59-67. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2017.07.008.
LI Hongjiang. Review on torsion and distortion in prestressed concrete box girders with corrugated steel webs[J]. Journal of Building Structures, 2017, 38(7): 59-67. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2017.07.008.
- [5] 王扣. 薄壁斜箱梁桥的扭转与畸变效应研究综述[J]. 科技创新与应用, 2016(22): 231-232.
WANG Kou. Summary of research on torsion and distortion effect of thin-walled inclined box girder bridge [J]. Technology Innovation and Application, 2016(22): 231-232.
- [6] 牛金龙, 金志强. 箱形截面扭转刚度的计算方法分析[J]. 结构工程师, 2014, 30(3): 71-74. DOI: 10.15935/j.cnki.jggcs.2014.03.043.
NIU Jinlong, JIN Zhiqiang. Torsion stiffness calculation method of a box cross-section structural member [J]. Structural Engineers, 2014, 30(3): 71-74. DOI: 10.15935/j.cnki.jggcs.2014.03.043.
- [7] 周奇. 薄壁钢箱梁自由扭转刚度和翘曲扭转刚度的计算[J]. 汕头大学学报, 2014, 29(1): 65-72.
ZHOU Qi. Calculation of free torsional stiffness and warping torsional stiffness of thin-walled steel box girder

- [J]. Shantou University Journal, 2014, 29(1): 65-72.
- [8] 郭靖宇, 管松, 年玉泽, 等. 单箱单室薄壁箱梁约束扭转分析[J]. 常州工学院学报, 2018, 31(3): 10-14, 27. DOI: 10.3969/j.issn.1671-0436.2018.03.003.
- GUO Jingyu, GUAN Song, NIAN Yuze, et al. An analysis of the torsion single-box single-cell thin-walled box girder [J]. Journal of Changzhou Institute of Technology, 2018, 31(3): 10-14, 27. DOI: 10.3969/j.issn.1671-0436.2018.03.003.
- [9] 吕毅刚, 饶攀, 韩伟威, 等. 独柱墩曲线箱梁桥抗倾覆实用计算方法研究[J]. 交通科学与工程, 2021, 37(3): 35-40. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2021.03.006.
- LYU Yigang, RAO Pan, HAN Weiwei, et al. Research on the practical calculation method of anti-overturning of the curved box girder bridge with single column pier[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2021, 37(3): 35-40. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2021.03.006.
- [10] 马俊军, 蔺鹏臻. 考虑悬臂板贡献的箱梁约束扭转效应研究[J]. 铁道建筑, 2018, 58(3): 10-14. DOI: 10.3969/j.issn.1003-1995.2018.03.03.
- MA Junjun, LIN Pengzhen. Study on restrained torsion effect for box girder considering contribution of cantilever slab[J]. Railway Engineering, 2018, 58(3): 10-14. DOI: 10.3969/j.issn.1003-1995.2018.03.03.
- [11] 颜东煌, 裴山, 刘国坤, 等. PC箱梁抗扭性能模型试验研究[J]. 中外公路, 2018, 38(2): 83-87. DOI: 10.14048/j.issn.1671-2579.2018.02.018.
- YAN Donghuang, PEI Shan, LIU Guokun, et al. Study of torsion performance model test of PC box girder[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2018, 38(2): 83-87. DOI: 10.14048/j.issn.1671-2579.2018.02.018.
- [12] 刘国坤, 颜东煌, 陈常松, 等. 混凝土斜拉桥箱梁强受扭损伤试验研究[J]. 桥梁建设, 2017, 47(6): 78-83. DOI: 10.3969/j.issn.1003-4722.2017.06.014.
- LIU Guokun, YAN Donghuang, CHEN Changsong, et al. Experimental investigation of strong torsion damage to box girder of a concrete cable-stayed bridge [J]. Bridge Construction, 2017, 47(6): 78-83. DOI: 10.3969/j.issn.1003-4722.2017.06.014.
- [13] 祝明桥, 伍绍慧, 潘华, 等. 钢纤维高强混凝土薄壁箱梁纯扭全过程分析[J]. 湘潭大学学报(自然科学版), 2012, 34(2): 41-46.
- ZHU Mingqiao, WU Shaohui, PAN hua, et al. Whole process analysis of pure torsional steel fiber high-strength concrete thin-walled box girder [J]. Journal of Xiangtan University (Natural Science Edition), 2012, 34(2): 41-46.
- [14] 周资斌, 鞠三. 提高混凝土箱梁截面抗剪扭性能的优化设计[J]. 中外公路, 2011, 31(4): 181-183. DOI: 10.14048/j.issn.1671-2579.2011.04.071.
- ZHOU Zibin, JU San. Optimal design to improve the shear and torsion resistance of concrete box girder section [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2011, 31(4): 181-183. DOI: 10.14048/j.issn.1671-2579.2011.04.071.
- [15] CHIDOLUE C, AGINAM C. Effect of shape factor on the flexural-torsional-distortional behaviour of thin-walled box girder structures[J]. International Journal Of Engineering And Advanced Technology (IJEAT), 2012, 1(5): 469-479.
- [16] AGINAM C. Effect of wall thickness on the torsional-distortional response of thin-walled box girder structures [J]. Journal of Engineering and Applied Sciences, 2013, 8(9): 720-726.
- [17] 叶益军, 王银辉, 陈旭丹, 等. 偏心荷载作用下多室宽箱梁弯扭特性分析[J]. 交通标准化, 2014, 42(2): 1-4. DOI: 10.16503/j.cnki.2095-9931.2014.02.003.
- YE Yijun, WANG Yinhui, CHEN Xudan, et al. Flexure and torsion characteristic about wide multi-cell-box girder under eccentric loads [J]. Transportation Standardization, 2014, 42(2): 1-4. DOI: 10.16503/j.cnki.2095-9931.2014.02.003.
- [18] 刘虹延, 李铎, 曹旭. 腹板对单索面宽幅混凝土斜拉桥抗扭性能的影响[J]. 铁道建筑, 2017, 57(7): 9-12. DOI: 10.3969/j.issn.1003-1995.2017.07.03.
- LIU Hongyan, LI Duo, CAO Xu. Influence of web on torsional performance of wide concrete cable-stayed bridge with single cable plane[J]. Railway Engineering, 2017, 57(7): 9-12. DOI: 10.3969/j.issn.1003-1995.2017.07.03.
- [19] 樊新星. 大跨钢箱梁斜拉桥参数敏感性分析[J]. 公路与汽运, 2019(4): 101-103, 107. DOI: 10.3969/j.issn.1671-2668.2019.04.024.
- FAN Xinxing. Parameter sensitivity analysis of long-span

- steel box girder cable-stayed bridge [J]. Highways & Automotive Applications, 2019 (4): 101-103, 107. DOI: 10.3969/j.issn.1671-2668.2019.04.024.
- [20] 曹旭, 陈香杰. 横隔梁对多箱室宽箱梁抗扭影响研究 [J]. 公路, 2017, 62(1): 96-100.
CAO Xu, CHEN Xiangjie. Study on the influence of transverse diaphragm beam on torsion resistance of multi-box wide box girder [J]. Highway, 2017, 62(1): 96-100.
- [21] 王新敏. ANSYS 工程结构数值分析 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2007.
- WANG Xinmin. Numerical analysis of ANSYS engineering structure [M]. Beijing: China Communications Press, 2007.
- [22] 胡玉茹, 刘亮, 张元海. 斜腹板箱形截面的扭转几何特性 [J]. 中南大学学报(自然科学版), 2015, 46(7): 2558-2563.
HU Yuru, LIU Liang, ZHANG Yuanhai. Torsional geometrical properties of box section with inclined webs [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2015, 46(7): 2558-2563.
- (责任编辑:欧兆虎;校对:罗容;英文编辑:陈璐)

(上接第51页)

122789. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.122789.
- [15] 姚运仕, 王嘉. 盐渍土对泡沫轻质土强度及耐久性的影响 [J]. 长安大学学报(自然科学版), 2021, 41(3): 33-41. DOI: 10.19721/j.cnki.1671-8879.2021.03.004.
YAO Yunshi, WANG Jia. Effects of strength and durability of salted soil to foam lightweight soil [J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2021, 41(3): 33-41. DOI: 10.19721/j.cnki.1671-8879.2021.03.004.
- [16] KANG S H, KWON Y H, MOON J. Influence of calcination temperature of impure kaolinitic clay on hydration and strength development of ultra-high-performance cementitious composite [J]. Construction and Building Materials, 2022, 326: 126920. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.126920.
- (责任编辑:欧兆虎;校对:李脉;英文编辑:郭一鹏)