

非对称薄壁箱形截面的扭转几何特性研究

李征豹, 张元海*

(兰州交通大学 土木工程学院, 兰州 730070)

摘要:为了揭示顶板单向横坡对薄壁箱形截面扭转几何特性的影响,推导了顶板为倾斜布置的非对称薄壁箱形截面扭转中心位置、主扇性坐标及主扇性惯性矩的实用计算公式。运用推导的实用公式并结合数值算例,比较顶板倾斜布置和水平布置对截面扭转几何特性的影响,并分析了顶板横坡、箱室高宽比及悬臂板宽度变化对扭转几何特性的影响规律。研究表明,本文计算值与有限元软件 ANSYS 中截面特性计算结果吻合很好;当不考虑顶板横坡时,对扭转中心横向位置及高腹板与底板交点处的主扇性坐标影响显著;当箱室高宽比小于 0.65 时,其变化对扭转中心的横向位置有显著影响;主扇性惯性矩随顶板横坡的增大而减小,随悬臂板宽度及箱室高宽比的增大而增大。

关键词:非对称箱形截面;截面几何特性;扭转中心;主扇性坐标;主扇性惯性矩

中图分类号:U448.213

文献标志码:A

文章编号:1007-4708(2023)04-0628-06

1 引言

按薄壁箱梁理论分析箱梁约束扭转时,需要计算箱形截面扭转中心、主扇性坐标及主扇性惯性矩等几何特性值^[1,2],其计算过程非常繁琐。为简便有效地计算箱形截面的几何特性值,国内外学者开展了大量的研究工作。陈淮等^[3,4]借助薄壁梁弯曲理论,考虑箱梁顶板和翼缘板不同厚度,推导了单箱单室箱形截面扭转中心位置的计算公式。李学罡等^[5]在此基础上,推导了单箱双室箱形截面扭转中心位置计算公式。胡玉茹等^[6]根据薄壁箱梁约束扭转理论中的一般方法,推导了斜腹板箱形截面扭转几何特征值的计算公式。然而,上述研究工作都是针对有竖向对称轴的箱形截面进行的,没有考虑顶板横坡的影响。路晓明等^[7,8]在节线法的基础上运用刚度等效原理推导了复杂截面扭转中心位置的计算公式。Pokić等^[9,10]根据薄壁箱梁扭转理论并借助薄壁箱梁弯曲理论编制开闭口截面几何特性值的计算程序。石琴等^[11]给出了分段计算薄壁截面几何特征值的积分表达式。周凌远等^[12]用变分原理建立了有限元方程,进而求解截面扭转中心位置。徐秀丽等^[13]利用空间有限元软件的分析功能计算薄壁箱梁截面的抗扭参数。Barretta

等^[14]推导了非对称槽形截面的扭转中心位置计算公式。

本文针对顶板为单向横坡构造的非对称直腹板单箱单室箱形截面,推导给出了此类非对称箱形截面扭转几何特性值的计算公式,并结合数值算例,具体分析顶板单横坡、箱室高宽比和悬臂板宽度变化对截面扭转几何特性的影响规律。

2 扭转几何特性计算

2.1 扭转中心位置

如图 1 所示顶板为单横坡构造的直腹板单箱单室箱形截面, a, a_1 和 a_2 分别为顶板宽度、箱室顶宽及悬臂板宽度, b 为箱室底宽, h 为顶底板中心点的竖向距离(下文称为梁高), h_1 和 h_2 分别为高腹板和低腹板高度, t_a, t_b 和 t_h 分别为顶底板厚度和腹板厚度, i 为顶板单横坡坡度, d 为扭转中心 A 至底板中面的垂直距离, f 为扭转中心(下文称为扭心)至高腹板中面的水平距离。截面各关键点分别在图中用数字 1~6 标出。直角坐标系的原点位于截面形心 C 处。为确定扭心 A(x_A, y_A) 的位置及以 A 为极点的主扇性坐标 ω_A , 可任选一点 B(x_B, y_B) 作为辅助极点,并求出以 B 为极点的辅助扇性坐标 ω_B , 则主扇性坐标 ω_A 可计算^[15]为

$$\omega_A = \omega_B + a_y x - a_x y + c \quad (1)$$

式中 $a_y = y_A - y_B, a_x = x_A - x_B, c$ 为取决于周线坐标 s 起始点位置的常数。其计算公式为

收稿日期:2022-01-12;修改稿收到日期:2022-05-26.

基金项目:国家自然科学基金(51968040)资助项目.

作者简介:张元海*(1965-),男,博士,博士生导师,教授

(E-mail:zyh17012@163.com).

$$a_y = (I_x I_{\omega_{B,y}} - I_{xy} I_{\omega_{B,x}}) / (I_{xy}^2 - I_x I_y) \quad (2)$$

$$a_x = (I_y I_{\omega_{B,x}} - I_{xy} I_{\omega_{B,y}}) / (I_x I_y - I_{xy}^2) \quad (3)$$

$$c = -\frac{1}{F} \int_F \omega_B dF \quad (4)$$

式中 $I_{\omega_{B,y}} = \int_F \omega_B x dF$, $I_{\omega_{B,x}} = \int_F \omega_B y dF$, I_x , I_y 和 I_{xy} 为横截面分别对 x 轴和 y 轴的惯性矩及惯性积。

辅助极点 B 选在顶板中心点处,周线坐标 s (以逆时针方向为正)的起始点也选在该点处,绘出相应的辅助扇性坐标 ω_B 如图 2 所示。其在箱形截面顶板范围内具有反对称的性质,在底板与腹板范围内并无规律可循。各关键点的辅助扇性坐标分别为

$$\omega_{B1} = \omega_{B3} = -\omega_{B5} = -\omega_{B6} = -a_1 / (2t_a) \Psi \quad (5)$$

$$\omega_{B2} = \frac{1}{2} b h_1 - \left(\frac{a_1}{2t_a} + \frac{h_1}{t_h} \right) \Psi \quad (6)$$

$$\omega_{B4} = -\frac{1}{2} b h_2 + \left(\frac{a_1}{2t_a} + \frac{h_2}{t_h} \right) \Psi \quad (7)$$

$$\text{式中 } \Psi = 2bh / \left(\frac{a_1}{t_a} + \frac{b}{t_b} + \frac{2h}{t_h} \right) \quad (8)$$

横截面对 x 轴和 y 轴的惯性矩及惯性积表达为

$$I_x = at_a \left[\frac{t_a^2 + a^2 i^2}{12(1+i^2)} + y_c^2 \right] + bt_b \left[\frac{t_b^2}{12} + (h-y_c)^2 \right] + \frac{1}{6} t_h [2(h_1^3 + h_2^3) - 3(h-y_c)(b^2 i^2 + 4h y_c)] \quad (9)$$

$$I_y = at_a \left[\frac{a^2 + t_a^2 i^2}{12(1+i^2)} + x_c^2 \right] + bt_b \left(\frac{1}{12} b^2 + x_c^2 \right) + \frac{1}{6} t_h (h t_h^2 + 3b^2 h - 6b^2 i x_c + 12h x_c^2) \quad (10)$$

$$I_{xy} = \frac{i(at_a^3 - t_a a^3)}{12(1+i^2)} - \frac{t_h b^2 i}{8F} (4bt_b h + 4t_h h^2 - t_h b^2 i^2) \quad (11)$$

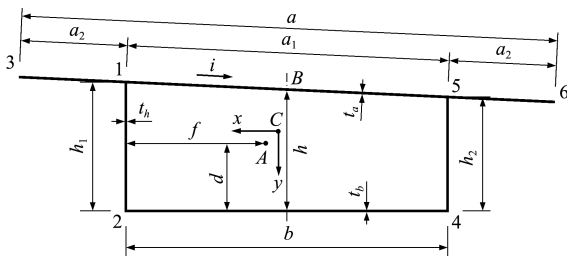


图 1 顶板单横坡构造的直腹板箱形截面
Fig. 1 Box section with single-cross slope on the top plate

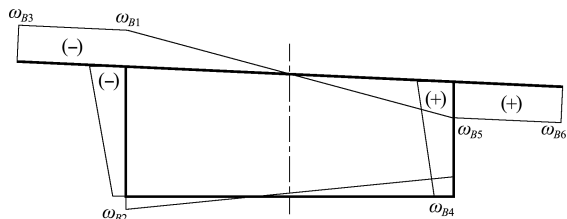


图 2 辅助扇性坐标
Fig. 2 Diagram of auxiliary sector coordinate

式中

$$\begin{cases} F = bt_b + at_a + 2ht_h \\ y_c = \frac{1}{F} \left[bt_b h + t_h \left(h^2 - \frac{1}{4} b^2 i^2 \right) \right] \\ x_c = \frac{1}{2F} b^2 t_h i \end{cases} \quad (12)$$

所得 ω_B 图分别与 x 图和 y 图(为节省篇幅未给出)进行图乘,得到 $I_{\omega_{B,y}}$ 和 $I_{\omega_{B,x}}$ 的计算公式为

$$I_{\omega_{B,y}} = -\frac{b\Psi}{24} (3a^2 - a_1^2) + \frac{t_h b}{2} \left[\frac{a_1 \Psi}{t_a} (i x_c - h) + \frac{1}{8} \left(b - \frac{2\Psi}{t_h} \right) (4h^2 + b^2 i^2 - 8h i x_c) \right] + \frac{1}{12} b^2 t_b \left[\left(b - \frac{2\Psi}{t_h} \right) (h - 3i x_c) - \frac{a_1}{t_a} \Psi \right] \quad (13)$$

$$I_{\omega_{B,x}} = \frac{bi\Psi}{24} (3a^2 - a_1^2) + \frac{b^2 i t_b}{4} \left(b - \frac{2\Psi}{t_h} \right) (h - y_c) + \frac{1}{2t_a} t_h a_1 b i y_c \Psi + \frac{1}{6} b i h (2h - 3y_c) (t_h b - 2\Psi) + \frac{1}{48} (4h^2 + b^2 i^2) (2bi\Psi - b^2 i t_h) \quad (14)$$

结合式(2,3)容易求出截面扭心 A 至辅助极点 B 的距离,则扭心 A 至底板中面的垂直距离 d 及其至高腹板中面的水平距离 f 为

$$d = h - a_y, \quad f = \frac{1}{2} b - a_x \quad (15, 16)$$

2.2 主扇性坐标及主扇性惯性矩

根据图 2 及式(4~8)可求出 c 的表达式为

$$c = -\frac{ib}{2F} \left[b h t_h + \frac{1}{2} b^2 t_b - \left(\frac{a_1 t_h}{t_a} + 2h + \frac{b t_b}{t_h} \right) \Psi \right] \quad (17)$$

则各关键点的主扇性坐标计算公式分别为

$$\omega_1 = -\frac{a_1}{2t_a} \Psi + a_y \left(\frac{1}{2} b - x_c \right) + a_x \left(y_c + \frac{bi}{2} \right) + c \quad (18)$$

$$\omega_2 = \frac{1}{2} b h_1 - \left(\frac{a_1}{2t_a} + \frac{h_1}{t_h} \right) \Psi + a_y \left(\frac{1}{2} b - x_c \right) - a_x (h - y_c) + c \quad (19)$$

$$\omega_3 = -\frac{a_1}{2t_a} \Psi + a_y \left(\frac{ab}{2a_1} - x_c \right) + a_x \left(y_c + \frac{abi}{2a_1} \right) + c \quad (20)$$

$$\omega_4 = -\frac{1}{2} b h_2 + \left(\frac{a_1}{2t_a} + \frac{h_2}{t_h} \right) \Psi - a_y \left(\frac{1}{2} b + x_c \right) - a_x (h - y_c) + c \quad (21)$$

$$\omega_5 = \frac{a_1}{2t_a} \Psi - a_y \left(\frac{1}{2} b + x_c \right) + a_x \left(y_c - \frac{1}{2} bi \right) + c \quad (22)$$

$$\omega_6 = \frac{a_1}{2t_a} \Psi - a_y \left(\frac{ab}{2a_1} + x_c \right) + a_x \left(y_c - \frac{abi}{2a_1} \right) + c \quad (23)$$

通过对主扇性坐标图自乘,即可求得主扇性惯性矩 I_ω , 经整理后可表达为

$$I_{\omega} = \frac{1}{6} [2t_a a_1 (\omega_1^2 + \omega_1 \omega_5 + \omega_5^2) + t_a (a - a_1) \times (\omega_1^2 + \omega_3^2 + \omega_1 \omega_3 + \omega_5 \omega_6 + \omega_5^2 + \omega_6^2) + 2t_b b (\omega_2^2 + \omega_2 \omega_4 + \omega_4^2)] + \frac{t_h}{3} [h_1 (\omega_1^2 + \omega_1 \omega_2 + \omega_2^2) + h_2 (\omega_4^2 + \omega_4 \omega_5 + \omega_5^2)] \quad (24)$$

3 数值算例验证

图3所示顶板为单横坡构造的直腹板单箱室箱形截面,其截面尺寸为 $a=13\text{ m}$, $b=5.5\text{ m}$, $h=1.2\text{ m}$, $t_a=0.3\text{ m}$, $t_b=0.3\text{ m}$, $t_h=0.5\text{ m}$,横坡 $i=10\%$ 。以此截面为基础,维持其他条件参数不变,仅以横坡 i 为变量,按本文公式计算其扭心位置并与Ansys建模结果对比,对比结果列入表1,其中 δ 为相对误差。可见本文计算结果与Ansys中截面特性计算结果吻合良好。

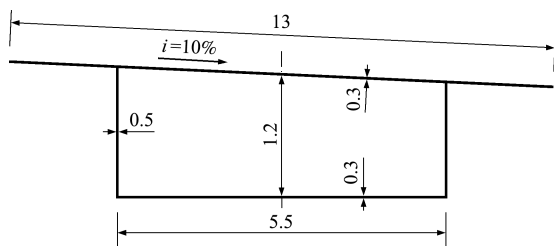


图3 顶板单横坡构造的直腹板箱形截面尺寸(单位:m)
Fig. 3 Dimension of straight web single-cell box section with single-cross slope on the top plate (unit:m)

表1 不同横坡时扭心位置计算结果对比
Tab. 1 Comparison of calculation results of twist center position for different cross slopes

$i/\%$	d/cm		$\delta/\%$	f/cm		$\delta/\%$
	本文解	Ansys解		本文解	Ansys解	
0	0.6016	0.5901	1.949	2.75	2.7500	0
2	0.6037	0.5922	1.942	2.6207	2.6179	0.107
6	0.6201	0.6090	1.823	2.3667	2.3582	0.360
10	0.6518	0.6412	1.653	2.1263	2.1125	0.653

注: $\delta=(\text{本文结果}-\text{Ansys结果})/\text{Ansys结果} \times 100\%$ 。

表2为按本文公式计算图3所示箱形截面的扭转几何特性值与简化成顶板为平坡构造时的计算结果对比。由表2可知,若不考虑顶板横坡,截面扭转几何特性值会产生较大的误差,扭心水平位置及高腹板与底板交点处主扇性坐标(即 ω_2)的误差尤为显著,直接导致箱梁约束扭转计算中翘曲正应力的计算错误。

按本文公式计算截面各关键点处主扇性坐标,作出图3所示的箱形截面在单横坡坡度分别为 $i=$

0%和 $i=10\%$ 时主扇性坐标如图4所示。

表2 两种横坡时扭转几何特性值计算结果对比
Tab. 2 Comparison of calculation results of torsional geometrical properties for two types of cross slopes

$i/\%$	d/m	f/m	ω_1/m^2	ω_2/m^2	ω_3/m^2	I_{ω}/m^6
0	0.6016	2.75	-1.2724	1.2636	0.9716	3.407
10	0.6518	2.1263	-1.1887	1.0106	1.0814	3.123
$\delta/\%$	8.344	-22.68	-6.578	-20.02	11.3	-8.336

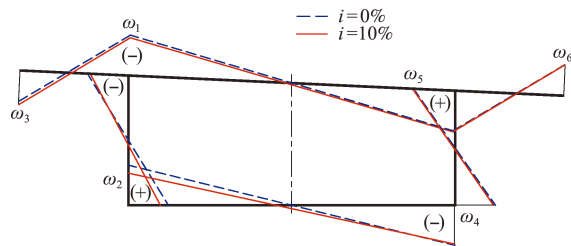


图4 顶板单横坡构造的箱形截面主扇性坐标
Fig. 4 Diagram of principal sector coordinate of box section with single cross slope on the top plate

4 参数影响分析

为考察箱形截面顶板单横坡对扭心位置的影响,以图3所示的箱形截面为基础,保持顶板宽度 a 、底板宽度 b 及各板件壁厚不变,取梁高 h 分别为1 m,1.2 m和2.2 m,即梁高与箱室宽度之比 h/b (称为箱室高宽比)分别为0.18,0.22和0.4。以横坡 i 为变量,绘出扭心至高腹板中面的水平距离 f 随坡度的变化曲线及 $h=1.2\text{ m}$ 即 $h/b=0.22$ 时扭心至底板中面的垂直距离 d 随坡度的变化曲线如图5所示。可以看出,扭心至高腹板中面的水平距离随坡度的增大基本呈线性减小趋势,至底板中面的垂直距离随坡度的增大而增大。当箱室高宽比 $h/b=0.4$ 时,扭心至高腹板中面的水平距离

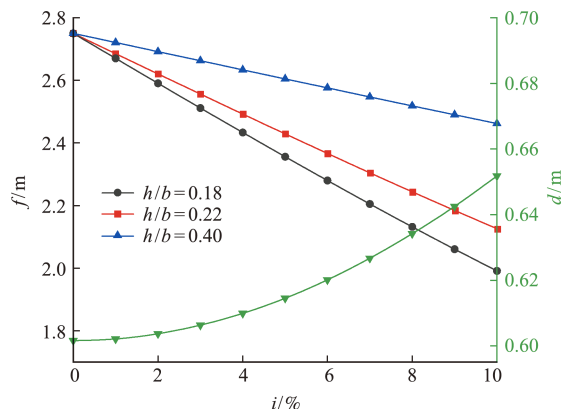


图5 扭心位置随横坡的变化曲线
Fig. 5 Variation of twist center position with cross slope

f 最大减小了约 28.8 cm, 减少幅度约 10.5%, 当箱室高宽比 $h/b=0.18$ 时, 最大减小了约 75.8 cm, 减少幅度约 27.6%; 当箱室高宽比 $h/b=0.22$ 时, 扭心至底板中面的垂直距离 d 最大增大了约 5 cm, 增大幅度约 8.3%。这表明在常用的横坡坡度范围内, 随着坡度的增大, 扭心在微弱上升的同时会向高腹板一侧有较大偏移, 且箱室高宽比越小时其偏移越明显。

图 6 以图 3 所示的箱形截面为基础, 取横坡 $i=2\%$ 时, 扭心至底板中面的相对距离 (d/h) 及其至高腹板中面的相对距离 ($f/0.5b$) 随箱室高宽比的变化曲线。可以看出, 当箱室高宽比小于 0.65 时, 扭心位置受箱室高宽比的影响显著; 存在一个箱室高宽比的临界值, 使得扭心位置不随横坡的变化而发生偏移; 研究表明, 此箱室高宽比临界值随悬臂板宽度与箱室宽度之比 (称为悬臂板相对宽度) 的增大而单调减小。

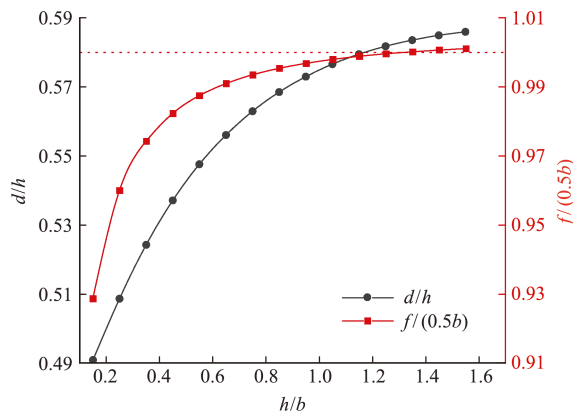


图 6 扭心位置随箱室高宽比的变化曲线
Fig. 6 Variation of twist center with the ratio of the cell height and width

图 7 是以图 3 所示的箱形截面为基础, 取 $i=2\%$, 箱室高宽比 h/b 分别为 0.22 和 0.65 时, 扭心至底板中面的相对距离随悬臂板相对宽度的变化曲线。可以看出, 当悬臂板相对宽度小于 0.25 时, 扭心至底板的相对距离随悬臂板相对宽度的增大而减小, 当悬臂板相对宽度超过 0.25 后, 随悬臂板相对宽度的增大而增大。且箱室高宽比为 0.22 时, 扭心至底板的相对距离比 0.65 时要小。

为考察箱形截面顶板单横坡对其主扇性坐标的影响, 以图 3 所示的箱形截面为基础, 维持其他条件参数不变, 仅以横坡 i 为变量, 将高腹板一侧 3 个关键点处的主扇性坐标计算结果列入表 3。由表 3 可知, 若不考虑正负号, 高腹板与顶 (ω_1)、底板 (ω_2) 交点处的主扇性坐标随坡度的增大而减

小; 悬臂板端部 (ω_3) 的主扇性坐标随坡度的增大而增大。

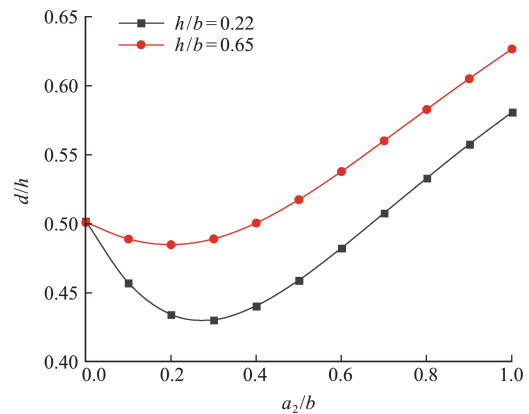


图 7 扭心位置随悬臂板相对宽度的变化曲线
Fig. 7 Variation of twist center with cantilever plate width

表 3 主扇性坐标计算结果

Tab. 3 Principal sector coordinate calculation results

$i/\%$	ω_1/m^2	ω_2/m^2	ω_3/m^2
0	-1.2724	1.2636	0.9716
2	-1.2583	1.2317	0.9868
4	-1.2425	1.1890	1.0059
6	-1.2253	1.1369	1.0284
8	-1.2073	1.0769	1.0537
10	-1.1887	1.0106	1.0814

为考察顶板单横坡坡度、箱室高宽比及悬臂板宽度变化对主扇性惯性矩的影响。以图 3 所示的箱形截面为基础, 取梁高 h 分别为 1 m, 1.2 m 和 2.2 m, 即箱室高宽比 h/b 分别为 0.18, 0.22 和 0.4, 维持其他条件参数不变, 仅以横坡 i 为变量, 将其主扇性惯性矩的计算结果列入表 4。取横坡 $i=2\%$, 箱室高宽比 h/b 分别为 0.22 和 0.65, 维持其他条件参数不变, 只改变悬臂板宽度, 绘出主扇性惯性矩随悬臂板相对宽度的变化曲线如图 8 所示。

由表 4 可知, 主扇性惯性矩随坡度的增大而减小, 随箱室高宽比的增大而迅速增大; 且当箱室高

表 4 主扇性惯性矩 I_ω 计算结果 (单位: m^6)

Tab. 4 Principal sector moment of inertia calculation results (unit: m^6)

$i/\%$	$h/b=0.18$	$h/b=0.22$	$h/b=0.40$
0	2.4679	3.4069	9.2508
2	2.4548	3.3945	9.2424
4	2.4163	3.3579	9.2173
6	2.3546	3.2987	9.1759
8	2.2734	3.2193	9.1186
10	2.1773	3.1230	9.0461

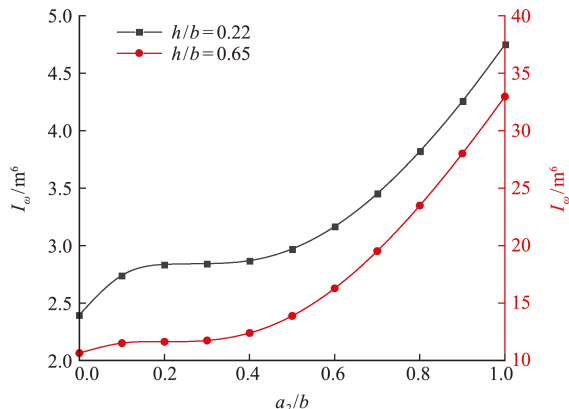


图8 主扇性惯性矩随悬臂板宽度的变化曲线

Fig. 8 Variation of principal sector moment of inertia with cantilever plate width

宽比越小时,其对主扇性惯性矩的影响越显著。从图8可以看出,主扇性惯性矩随悬臂板宽度的增大而增大;当悬臂板相对宽度小于0.1时,主扇性惯性矩的增大程度相对较大,大于0.1至小于0.5时曲线又趋于平缓,大于0.5之后,随悬臂板宽度的增大而迅速增大,且箱室高宽比较大时其增大程度更为显著。

需要指出的是,本文中箱梁截面特性值的计算公式及悬臂板宽度对截面特性值的影响规律皆是在薄壁箱梁约束扭转理论中刚周边假设成立的前提下得到的结果。对于悬臂板相对宽度很大的箱形截面梁,如展翅梁,其长悬臂板在主梁约束扭转中参与主梁共同工作的程度需进一步研究。

5 结 论

(1) 本文根据薄壁箱梁约束扭转理论,考虑实际工程中薄壁箱梁顶板具有单向横坡,导出了顶板为单横坡构造的非对称薄壁箱形截面扭心、主扇性坐标及主扇性惯性矩的实用计算公式并验证了其正确性,可供实际工程应用。

(2) 顶板为单横坡构造的箱形截面与简化为平坡构造的截面相比,扭心横向位置及高腹板与底板交点处的主扇性坐标会产生较大的相对误差;当箱室高宽比越小时,顶板单横坡坡度对截面各扭转几何特性值的影响越大。

(3) 扭心至高腹板中面的水平距离随顶板单横坡坡度的增大基本呈线性减小趋势,且箱室高宽比小于0.65时,其变化显著。主扇性惯性矩随顶板单横坡坡度的增大而减小,随箱室高宽比及悬臂板宽度的增大而增大;当悬臂板宽度较大时,主扇性惯性矩随悬臂板宽度的增大而迅速增大。

参考文献(References):

- [1] 王兆强,赵金城. 开口薄壁梁的扭转理论与应用[J]. 力学学报, 2011, **43**(5): 963-967. (WANG Zhao-qiang, ZHAO Jin-cheng. Restrained torsion theory of open thin-walled beams and its application [J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2011, **43**(5): 963-967. (in Chinese))
- [2] LI X Y, WAN S, Shen K J, et al. Finite beam element with exact shape functions for torsional analysis in thin-walled single- or multi-cell box girders [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2020, **172**: 106189.
- [3] 陈 淮,曾庆元. 箱梁截面扭转中心位置的确定[J]. 铁道科学与工程学报, 2004, **1**(1): 74-77. (CHEN Huai, ZENG Qing-yuan. Calculation of torsion center position of box girder [J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2004, **1**(1): 74-77. (in Chinese))
- [4] 朱文正,陈 淮. 梯形截面箱梁扭心位置计算[J]. 郑州工业大学学报, 2001, **22**(2): 77-79. (ZHU Wen-zheng, CHEN Huai. Calculation of torsion center position of the trapezoidal section for box beam [J]. *Journal of Zhengzhou University of Technology*, 2001, **22**(2): 77-79. (in Chinese))
- [5] 李学罡,李 斌. 单箱双室箱梁截面扭转中心位置的确定[J]. 长沙交通学院学报, 2006, **22**(3): 11-14, 67. (LI Xue-gang, LI Bin. Calculation of torsion center position of single box multi-room box girder [J]. *Journal of Changsha Communications University*, 2006, **22**(3): 11-14, 67. (in Chinese))
- [6] 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 Yu-ru, LIU Liang, ZHANG Yuan-hai. Torsional geometrical properties of box section with inclined webs [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2015, **46**(7): 2558-2563. (in Chinese))
- [7] 路晓明,曹 海,龚耀清. 任意复杂截面梁的扭转中心[J]. 力学与实践, 2019, **41**(4): 453-457. (LU Xiao-ming, CAO Hai, GONG Yao-qing. Torsional center of beams of arbitrary complex cross-section [J]. *Mechanics in Engineering*, 2019, **41**(4): 453-457. (in Chinese))
- [8] Cheng X L, Chen H, Gong Y Q, et al. Stocky thin- or thick-walled beams: Theory and analysis [J]. *Engineering Structures*, 2018, **159**: 55-65.
- [9] Prokić A. Computer program for determination of geometrical properties of thin-walled beams with open-closed section [J]. *Computers & Structures*, 2000, **74** (6): 705-715.

- [10] Plazibat B, Matoković A. A computer program for calculating geometrical properties of symmetrical thin-walled cross-sections[J]. *Transactions of Famena*, 2011, **35**(4): 65-84.
- [11] 石 琴,陈朝阳.任意形状薄壁截面的几何特性参数的计算[J]. *机械工程学报*, 2004, **40**(10): 144-148. (SHI Qin, CHEN Chao-yang. Compute of geometric parameters of any thin sections[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2004, **40**(10): 144-148. (in Chinese))
- [12] 周凌远,李 乔,张士中.采用有限单元法计算梁任意形状截面特性[J]. *计算力学学报*, 2008, **25**(5): 634-639. (ZHOU Ling-yuan, LI Qiao, ZHANG Shi-zhong. Evaluation of arbitrary cross sectional properties with finite element method[J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2008, **25**(5): 634-639. (in Chinese))
- [13] 徐秀丽,王曙光,刘伟庆,等.薄壁箱梁截面抗扭参数的简化计算方法[J]. *中国公路学报*, 2007, **20**(2): 72-76, 96. (XU Xiu-li, WANG Shu-guang, LIU Wei-qing, et al. Simplified calculation method for torsion parameters of thin-walled box girder section[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2007, **20**(2): 72-76, 96. (in Chinese))
- [14] Barretta R, Diaco M. On the shear centre in Saint-Venant beam theory[J]. *Mechanics Research Communications*, 2013, **52**: 52-56.
- [15] 郭金琼,房贞政,郑 振.箱形梁设计理论(2版)[M].北京:人民交通出版社,2008. (GUO Jin-qiong, FANG Zhen-zheng, ZHENG Zhen. *Design Theory of Box Girder*(2nd Edition)[M]. Beijing: China Communications Press, 2008. (in Chinese))

Research on torsional geometric properties of asymmetric thin-walled box section

LI Zheng-bao, ZHANG Yuan-hai*

(School of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: In order to reveal the effect of the cross slope on the torsional properties of asymmetric thin-walled box section with inclined top plate, the practical formulas for calculating the twist center, principal sector coordinate and principal sector moment of inertia of cross section were derived. Based on the practical formulas, the effects of torsional geometrical properties between the inclined and horizontal top plate were compared, and the influences of the variations of the cross slope, cell height to width ratio and cantilever plate width on the torsional properties were analyzed. The research shows that the results in this paper are in good agreement with those computed by the finite element software ANSYS. When the cross slope is not considered, the lateral position of the twist center and the principal sector coordinate at the intersection of the higher web and bottom plate will be significantly affected. When the cell height to width ratio is less than 0.65, its change has a significant effect on the lateral position of the twist center. The principal sector moment of inertia decreases with the increase of the cross slope, and increases with the increase of the cantilever plate width and cell height to width ratio.

Key words: asymmetrical box section; geometrical properties of cross section; twist center; principal sector coordinate; principal sector moment of inertia

引用本文/Cite this paper:

李征豹,张元海.非对称薄壁箱形截面的扭转几何特性研究[J].*计算力学学报*, 2023, **40**(4): 628-633.

LI Zheng-bao, ZHANG Yuan-hai. Research on torsional geometric properties of asymmetric thin-walled box section[J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2023, **40**(4): 628-633.