

DOI:10.16799/j.cnki.esdqyfh.2022.11.020

钢箱梁翼缘板剪力滞后效应分析与探讨

张高峰¹, 童景盛²

(1.兰州有色冶金设计研究院有限公司, 甘肃 兰州 730030; 2.中国市政工程西北设计研究院有限公司, 甘肃 兰州 730000)

摘要:在我国钢桥建设中,钢箱梁是应用最为广泛的一种类型。对于市政钢箱梁,桥面往往较宽,采用单箱单室结构时,腹板间距较大,结构尺寸高而薄,受力复杂,常受到多种力的联合作用,因此确定合理的腹板间距及尺寸以获得良好的结构效应,是设计关注的重点,也是探讨的关键。拟通过计算单箱单室桥梁剪力滞效应,比选不同腹板间距的桥梁剪力滞系数,确定钢箱梁腹板间距的合理尺寸,从而为钢箱梁结构设计提供参考。

关键词: 钢箱梁;腹板;单箱单室;剪力滞系数

中图分类号: U443.32

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2022)11-0071-03

0 引言

随着城市交通的发展,钢箱梁因其抗弯抗扭刚度大、安装方便等特有的优势被广泛应用。同时,钢箱梁的许多问题逐渐显现,剪力滞问题尤其得到了设计者的重视。据相关研究发现,由于剪力滞的影响,翼缘处正应力与材料力学计算正应力相差较大,尤其在中等跨径桥梁支座截面处,此值达到 30%~50%。随着对剪力滞效应的深入研究发现,钢箱梁腹板不断变宽,剪力滞效应越明显。但随着城市化进程的不断推进,各种大跨和超宽钢箱梁不断涌现,所以合理的腹板间距对钢箱梁桥的安全显得尤为重要。

本文以兰州市某跨线桥工程为例,分析了单箱单室钢箱梁桥在设计工况下,考虑剪力滞效应后不同腹板间距桥梁的受力性能,得出腹板间距对桥梁受力的影响规律,为该类桥梁的设计提供一定的参考意义。

1 桥梁资料

本文桥梁结构采用 1-40 m 简支钢箱梁,桥梁分幅设置,箱室布置为单箱单室,桥梁宽度 10.0 m。桥梁横断面布置:0.5 m(防撞墙)+2×3.5 m(车行道)+2.5 m(人行道)。梁高 2 000 mm。材料采用 Q355 钢材。

桥面板采用正交异性板结构,顶底板厚度均为 16 mm,顶板纵向加劲肋采用闭合 U 肋,布置间距

500 mm,底板纵向加劲肋采用板肋,间距 350 mm。横隔板与横向加劲肋交错布置,其中横向加劲肋板厚 12 mm,布置间距 3 000 mm,横隔板板厚 12 mm,布置间距 3 000 mm;腹板厚 16 mm,腹板设三道纵向加劲肋,肋高 150 mm,布置间距 500 mm。

本文所选的单箱单室截面见图 1,通过比选钢箱梁三种不同腹板尺寸参数的计算结果,进而得出腹板尺寸间距的合理范围。钢箱梁尺寸参数详见表 1。

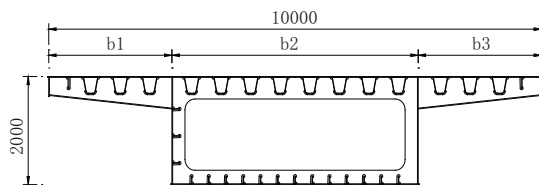


图 1 钢箱梁标准横断面图(单位:mm)

表 1 钢箱梁横断面几何参数

类别	几何参数/mm			
	桥面宽度	梁高	上翼缘宽 b1	腹板宽 b2
类别一	10 000	2 000	2 000	6 000
类别二	10 000	2 000	2 500	5 000
类别三	10 000	2 000	3 000	4 000

2 剪力滞分析^[1-6]

2.1 基本公式求解

本文计算模型忽略纵向加劲肋对截面刚度及形心的影响,箱梁截面简图见图 2。由于上下翼缘板剪切变形的影响,在应用最小势能计算钢箱梁弯曲时,初等梁理论的平截面假定已不适用。故在计算箱梁翼缘板的弯曲变形时,仅用挠度函数 $\omega(x)$ 已不满足需要,须引入翼缘板的纵向位移函数 $\mu(x, y)$ 。

收稿日期: 2022-05-16

作者简介: 张高峰(1994—), 男, 学士, 助理工程师, 从事桥梁结构设计与研究工作。

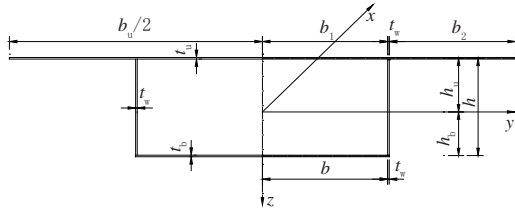


图2 钢箱梁截面图

$$\omega = \omega(x) \tag{1}$$

$$\mu(x, y) = h_i \left[\frac{d\omega}{dx} + \left(1 - \frac{y^3}{b^3}\right) u(x) \right] \tag{2}$$

式中: $\mu(x, y)$ 为梁的纵向位移; $u(x)$ 为翼缘板剪切转角的最大差值; b 为箱室净宽的一半; h_i 为截面形心到底板的距离。

在计算应变能时,腹板仍采用平截面假定,不考虑其剪切变形。上下翼板竖向正应力 $\sigma_x=0$,同时忽略板平面外的剪切变形 γ_{xz} 及横向应变 ε_y 。

根据最小势能原理,在结构处于平衡状态时,当有任何虚位移时,体系总势能的一阶变分为0。 \bar{W} 是体系的荷载势能, \bar{V} 是体系的形变势能。则

$$\delta \Pi = \delta(\bar{V} - \bar{W}) = 0 \tag{3}$$

梁受弯时的荷载势能:

$$\bar{W} = -\int M(x) \omega''(x) dx \tag{4}$$

梁的势能包括腹板、上下翼板的势能。

腹板势能:

$$\bar{V}_w = \frac{1}{2} \int EI_w (\omega'')^2 dx \tag{5}$$

式中: I_w 为腹板对截面形心的惯性矩。

上翼缘应变能:

$$\bar{V}_{su} = 2t_u \left\{ \frac{1}{2} \int_0^{b_u} (E\varepsilon_{xu1}^2 + G\gamma_{u1}^2) dx dy + \frac{1}{2} \int_0^{b_2} (E\varepsilon_{xu2}^2 + G\gamma_{u2}^2) dx dy \right\} \tag{6}$$

下翼缘应变能:

$$\bar{V}_{sb} = 2t_b \left\{ \frac{1}{2} \int_0^{b_1} (E\varepsilon_{xb}^2 + G\gamma_b^2) dx dy \right\} \tag{7}$$

其中:

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_{xu1} &= \frac{\partial u_u(x, y)}{\partial x} = h_u \left[(\omega'' + 1 - \frac{y^3}{b_1^3}) \mu'(x) \right] \\ \gamma_{u1} &= \frac{\partial u_u(x, y)}{\partial y} = -3h_u \mu(x) \frac{y^2}{b_1^3} \\ C_1 &= \frac{1}{k^3}, C_2 = \frac{chkl-1}{k^3shkl} \\ \varepsilon_{xu2} &= \frac{\partial u_u(x, y)}{\partial x} = h_u \left[(\omega'' + 1 - \frac{y^3}{b_2^3}) \mu'(x) \right] \\ \gamma_{u2} &= \frac{\partial u_u(x, y)}{\partial y} = -3h_u \mu(x) \frac{y^2}{b_2^3} \\ \varepsilon_{xb} &= \frac{\partial u_b(x, y)}{\partial x} = h_b \left[(\omega'' + 1 - \frac{y^3}{b_1^3}) \mu'(x) \right] \\ \gamma_b &= \frac{\partial u_b(x, y)}{\partial y} = -3h_b \mu(x) \frac{y^2}{b_1^3} \end{aligned} \right\} \tag{8}$$

将式(8)代入式(6)、式(7)得到:

$$\left. \begin{aligned} \bar{V}_{su} &= \frac{1}{2} \int_0^1 E\varepsilon_{su1} [(\omega'')^2 + \frac{3}{2}\omega''u' + \frac{9}{14}(u')^2 + \frac{9G}{5Eb_1^2}] dx \\ &+ \frac{1}{2} I_{su2} \int_0^1 EI_{su2} [(\omega'')^2 + \frac{3}{2}\omega''u' + \frac{9}{14}(u')^2 + \frac{9G}{5Eb_2^2}u^2] dx \\ \bar{V}_{sb} &= \frac{1}{2} \int_0^1 EI_{sb} [(\omega'')^2 + \frac{3}{2}\omega''u' + \frac{9}{14}(u')^2 + \frac{9G}{5Eb_1^2}u^2] dx \end{aligned} \right\} \tag{9}$$

其中:

$$I_{su1} = 2t_u b_1 h_u^2; I_{su2} = 2t_u b_2 h_u^2; I_{sb} = 2t_b b_1 h_u^2$$

体系的总势能为

$$\left. \begin{aligned} \Pi &= \bar{U} - \bar{W} = \bar{V}_{su} - \bar{V}_{sb} + \bar{V}_w - \bar{W} \\ &= \int_0^1 M(x) \omega'' dx + \frac{1}{2} \int \{ E [I_w (\omega'')^2 dx + \frac{1}{2} \int_0^1 E [I_s (\omega'')^2 \\ &+ \frac{3}{2} I_s \omega'' \mu' + \frac{9}{14} I_s (\mu')^2 + \frac{9G}{5b^2} \mu^2] dx \} \end{aligned} \right\} \tag{10}$$

其中, $I = I_w + I_s, I_s = I_{su1} + I_{su2} + I_{sb}, I_{s1} = \frac{1}{\xi_1^2} I_{su1} + \frac{1}{\xi_2^2} I_{su2} + \frac{1}{\xi_3^2} I_{sb}$

I 为不计翼板自身惯性矩的截面惯性矩; I_s 为不计翼板自身惯性矩时,上下翼板对截面形心轴的惯性矩; I_{s1} 为广义翼板惯性矩。

根据变分原理。令 $\delta \Pi = 0$,得到下列微分方程和边界条件。

$$\left. \begin{aligned} EI\omega'' + M(x) + \frac{3}{4}EI_s\mu' &= 0 \\ EI_s(-\frac{9}{14}u'' - \frac{3}{4}\omega'' + \frac{9}{5}\frac{Gu}{Eb^2}) &= 0 \end{aligned} \right\} \tag{11}$$

$$EI_s [\frac{9}{14}u'(l) + \frac{3}{4}\omega''(l)] \delta u(l) = 0$$

$$EI_s [\frac{9}{14}u'(0) + \frac{3}{4}\omega''(0)] \delta u(0) = 0$$

$$\text{令 } n = \frac{1}{1 - \frac{7}{8} \frac{I_s}{I}} \quad k = \frac{1}{b} \sqrt{\frac{14Gu}{5E}}$$

$$\left. \begin{aligned} u'' - k^2 u &= \frac{7nQ(x)}{6EI} \\ \omega^{(4)} = k^2 \omega'' &= \frac{k^2 M(x)}{EI} - \frac{nM''}{EI} \end{aligned} \right\} \tag{12}$$

则考虑剪力滞影响的翼板应力为

$$\sigma_x = \pm EZ_{\pm} \left\{ \frac{M(x)}{EI} - \left[1 - \frac{y^3}{(\xi_i b)^3} - \frac{3}{4} \frac{I_s}{I} \right] u'(x) \right\} \tag{13}$$

2.2 简支梁承受均布荷载剪力滞计算

简支梁承受均布荷载时,弯矩 $M(x) = \frac{q}{2}x(l-x)$,

剪力 $Q(x) = (l-x)$

$$u'' - k^2 u = \frac{7nq}{12EI} \quad u'' - k^2 u = \frac{7nQ(x)}{6EI}$$

上式的解为

$$u = -\frac{7nq}{6EI} \left(-\frac{1-2x}{2k^2} + C_1 shkx + C_2 chkx \right)$$

由边界条件:

$$u'|_{x=0} = 0, u'|_{x=l} = 0$$

求得:

$$C_1 = -\frac{1}{k^3}, C_2 = -\frac{chk l - 1}{k^3 shkl}$$

则:

$$u = \frac{7nq}{6EI k^2} \left(-\frac{1-2x}{2k^2} + \frac{shkx}{k} + \frac{chk l - 1}{k shkl} chkx \right)$$

则翼板的弯曲正应力:

$$\sigma_x = \pm \frac{Z_{\text{中(下)}}}{I} \left\{ M(x) - \frac{7nq}{6k^2} \left[1 - \frac{\gamma^3}{(\xi_i b)^3} - \frac{3}{4} \frac{I_s}{I} \right] \times \right. \\ \left. (1 - chkx + \frac{chk l - 1}{shkl} shkx) \right\} \quad (14)$$

截面剪力滞系数为:

$$\lambda = 1 - \frac{7nq}{6k^2 M(x)} \left[1 - \frac{\gamma^3}{(\xi_i b)^3} - \frac{3}{4} \frac{I_s}{I} \right] \times \\ (1 - chkx + \frac{chk l - 1}{shkl} shkx) \quad (15)$$

跨中截面处剪力滞系数为:

$$\lambda = 1 - \frac{28n}{3k^2 l^2} \left[1 - \frac{\gamma^3}{(\xi_i b)^3} - \frac{3}{4} \frac{I_s}{I} \right] \times \\ \left[1 - ch \frac{kl}{2} + \frac{chk l - 1}{2ch(kl/2)} \right] \quad (16)$$

将 1/2 截面、1/5 截面参数代入式(15)、式(16), 得截面剪力滞系数见表 2。

表 2 剪力滞系数对比表

类型位置	1/2 截面处		1/5 截面处	
	λ^a	λ^c	λ^a	λ^c
2.0 m 悬臂	1.028	0.988	1.043	0.982
2.5 m 悬臂	1.025	0.989	1.039	0.983
3.0 m 悬臂	1.010	0.996	1.016	0.993

2.3 剪力滞后效应分析

考虑剪力滞影响的钢箱梁上下翼缘的有效截面宽度为:

$$b_e^s = \sum_{i=1}^{n_e^s} b_{e,i}^s$$

式中: $b_{e,i}^s$ 为考虑剪力滞影响的第*i*块板段翼缘有效宽度。

2.3.1 第一体系按简支梁计算

其中钢箱梁翼缘有效宽度 $b_{e,i}^s$ 为

$$b_{e,i}^s = b_i, \frac{b_i}{l} \leq 0.05$$

$$b_{e,i}^s = (1.1 - 2 \frac{b_i}{l}) b_i, 0.05 < \frac{b_i}{l} < 0.3$$

$$b_{e,i}^s = 0.151 l, \frac{b_i}{l} \geq 0.03$$

式中: $b_{e,i}^s$ 为翼缘有效宽度; b_i 为腹板间距的 1/2,或翼缘外伸肢为伸臂部分的宽度; l 为换算跨径。

将截面参数代入上式,得到截面有效宽度,见表 3。

表 3 截面有效宽度对比表 单位:mm

有效宽度	类型			
	$b_{e,1}^s$	$b_{e,2}^s$	$b_{e,3}^s$	b_e^s
2.0 m 悬臂	2 000	2 850	2 000	9 700
2.5 m 悬臂	2 438	2 438	2 438	9 752
3.0 m 悬臂	2 850	2 000	2 850	9 700

2.3.2 第二体系按连续梁计算

连续梁有效宽度计算图式见图 3。

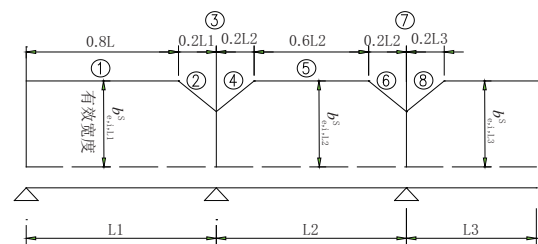


图 3 连续梁有效宽度计算图式

其中钢箱梁翼缘有效宽度为

$$b_{e,i}^s = b_i, \frac{b_i}{l} \leq 0.02$$

$$b_{e,i}^s = [1.06 - 3.2 \frac{b_i}{l} + 4.5 (\frac{b_i}{l})^2] b, 0.05 < \frac{b_i}{l} < 0.3$$

$$b_{e,i}^s = 0.151 l, \frac{b_i}{l} \geq 0.03$$

式中: $b_{e,i}^s$ 为翼缘有效宽度; b_i 为腹板间距的 1/2,或翼缘外伸肢为伸臂部分的宽度; l 为换算跨径。

将参数 $l=3\ 000\ \text{mm}$, ①处 $l=2\ 400\ \text{mm}$, ③⑦处 $l=1\ 200\ \text{mm}$, ②④⑥⑧处 $l=1\ 200\sim 2\ 400\ \text{mm}$, ⑤处 $l=1\ 800\ \text{mm}$ 代入。

得①处 $b_{e,1}^s=146.25\ \text{mm}$, $b_{e,2}^s=300\ \text{mm}$; ③⑦处 $b_{e,3}^s=109.55\ \text{mm}$, $b_{e,2}^s=235.5\ \text{mm}$; ⑤处 $b_{e,i}^s=140\ \text{mm}$, $b_{e,2}^s=296.4\ \text{mm}$, 其余数值线性内插。

3 结 语

通过以上对考虑剪力滞效应影响的翼板受力研究,主要可以得出以下结论:

(1)通过对不同腹板宽度剪力滞效应分析,内外翼板宽度越悬殊,剪力滞效应越显著。

(2)当箱梁跨宽比较大时剪力滞效应不太明显,但当跨宽比小于 3 时箱梁的剪力滞效应已相当严重。

(下转第 84 页)

置在车辆撞击下的损伤情况。从中可以发现,在车辆撞击后,迎撞面混凝土面板出现了塑性变形和单元失效现象。同时,撞击部位部分钢筋断裂,靠近撞击区域的波纹钢管在车辆撞击下出现了压溃变形,被撞梁撞击区域未出现明显塑性损伤。可以发现,超高韧性纤维增强水泥基复合材料-薄钢管不仅显著降低了车辆的撞击力峰值,还改善了主梁在车辆撞击下的损伤情况,较好地避免了被撞梁在超高车辆撞击下出现严重塑性损伤的情况。

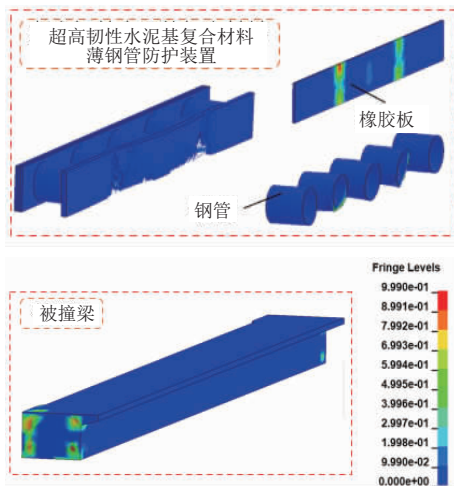


图 14 车辆撞击下 PVA-UHTCC - 薄钢管及被撞梁塑性损伤云图

3 结 语

为降低超高车辆撞击下桥梁上部结构的损伤问题,本文提出了 3 种适用于桥梁上部结构的防护装置,采用数值仿真方法,分析了 3 种防护装置在车辆撞击下的防护性能及被撞梁的塑性损伤。研究发现,本文提出的防护装置可以有效降低车辆撞击下被撞梁体的塑性损伤程度,同时泡沫铝材和 PVA-UHTCC 复合材料-薄钢管两种防护装置在车辆撞击下的损伤变形较小,可以达到反复利用的效果,能够为桥梁工程防撞装置设计提供相应的参考依据。

参考文献:

- [1] Murray Y D, Abu-Odeh A Y, Bligh R P. Evaluation of LS-DYNA concrete material model 159[R]. FHWA-HRT-05-063, 2007.
- [2] 陆新征,何水涛,黄盛楠.超高车辆撞击桥梁上部结构研究—破坏机理、设计方法和防护对策[M].北京:中国建筑工业出版社,2011.
- [3] 田力,朱聪.碰撞冲击荷载作用下钢筋混凝土柱的损伤评估及防护技术[J].工程力学,2013(9):144-150.
- [4] 张志勇.波纹钢管—UHPC 组合防撞结构冲击试验及多目标优化研究[D].长沙:湖南大学,2019.
- [5] 徐世焯,陈超,李庆华,等.超高韧性水泥基复合材料动态压缩力学性能的数值模拟研究[J].工程力学,2019,36(9):59-68.

(上接第 73 页)

(3)箱梁竖向弯曲时,上翼板与腹板交汇处产生正剪力滞效应,而且比较显著,上下翼板等宽时为正剪力滞效应。

(4)在均布荷载作用下,剪力滞系数从跨中到支座方向逐渐增大,且腹板间距越大,剪力滞越明显。

(5)在均布荷载作用下,悬臂长度越大时,翼缘板刚度占截面刚度比值越大,剪力滞越明显。

参考文献:

- [1] 周远棣,徐君兰.钢桥[M].北京:人民交通出版社,2003.
- [2] 吴冲.现代钢桥[M].北京:人民交通出版社,2006.
- [3] 贾高炯.钢箱梁桥设计[M].北京:人民交通出版社,2016.
- [4] 欧阳永金.大宽跨比连续钢箱梁桥的剪力滞效应研究[J].世界桥梁,2009(1):29-32.
- [5] 赵川,周亦唐,缪昇,等.简支薄壁箱梁剪力滞后效应探讨[J].钢结构,2005,20(3):4.
- [6] 项海帆.高等桥梁结构理论[M].北京:人民交通出版社,2013.