

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.202104046



集中荷载和均布荷载作用下 悬臂箱梁剪力滞效应试验

雒家琪, 董毓利, 赵明岩

(华侨大学 土木工程学院, 福建 厦门 361021)

摘要: 对悬臂箱梁进行集中荷载和均布荷载的加载试验, 探讨沿箱梁轴向剪力滞影响程度的变化, 以及加载形式对悬臂箱梁不同区域的剪力滞影响. 结果表明: 在集中荷载和均布荷载作用下, 悬臂箱梁同时存在正剪力滞现象和负剪力滞现象, 从自由端至固定端方向, 箱梁受负剪力滞的影响逐渐减小, 受正剪力滞的影响逐渐增大; 均布荷载作用下的剪力滞系数大于初等梁理论的计算值; 相较于均布荷载, 悬臂箱梁在集中荷载作用下受剪力滞的影响较小, 正、负剪力滞分界点离固定端较远.

关键词: 悬臂箱梁; 剪力滞; 集中荷载; 均布荷载

中图分类号: U 448.21

文献标志码: A

文章编号: 1000-5013(2022)01-0044-07

Test on Shear Lag Effect of Cantilever Box Girder Under Concentrated Load and Uniformly Distributed Load

LUO Jiaqi, DONG Yuli, ZHAO Mingyan

(College of Civil Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

Abstract: The cantilever box girder is tested under concentrated load and uniformly distributed load. The influence of the shear lag along the axial direction of the box girder and the influence of the loading form on the shear lag of different regions of the cantilever box girder are discussed. The result shows that under concentrated load and uniformly distributed load, there are both positive and negative shear lag phenomena in cantilever box girder. From the free end to the fixed end, the influence of negative shear lag on box girder decreases gradually, and the influence of positive shear lag increases gradually. The shear lag coefficient under the uniformly distributed load is greater than the calculation value of the elementary beam theory. Compared with the uniformly distributed load, the cantilever box girder is less affected by the shear lag under the concentrated load, the demarcation point of positive and negative shear lag is far from the fixed end.

Keywords: cantilever box girder; shear lag; concentrated load; uniformly distributed load

桥梁中的悬臂箱梁及悬臂施工阶段均属于悬臂体系, 悬臂梁在受力弯曲时, 剪力滞沿轴向的变化较为复杂, 同时存在正剪力滞现象和负剪力滞现象, 相较于正剪力滞, 负剪力滞更容易造成板中间位置破损, 因此, 对负剪力滞效应进行研究尤为重要^[1-5]. 段燕娥等^[6]对桥梁工程中的负剪力滞效应进行系统论述, 采用变分法计算均布荷载作用下关键点剪力滞系数. 基于能量变分原理, 卢海林等^[7]推导悬臂箱梁剪力滞计算公式, 并用 ANSYS 软件分析腹板间距、悬臂板宽度、曲率半径、箱梁高度和厚度对负剪力滞

收稿日期: 2021-04-23

通信作者: 董毓利(1965-), 男, 教授, 博士, 博士生导师, 主要从事结构抗火的研究. E-mail: DongYL@hqu.edu.com.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51978293, 51278207); 华侨大学研究生科研创新基金资助项目(18013086022)

效应的影响. 何志刚等^[8]推导出考虑截面配筋后的剪力滞控制微分方程, 研究截面配筋对变截面悬臂箱梁剪力滞效应的影响. 文献[9-10]首次得出角隅轴向荷载作用下翼板出现应力不均匀分布的荷载及边界条件. 周月娥等^[11]采用 Dirac 函数处理由外荷载引起的势能, 求得箱梁挠度和附加挠度的域内控制微分方程及边界条件. 吴贺贺^[12]推导薄壁悬臂箱梁的上翼板的正应力理论解. 除了理论分析之外, 许多学者利用有限元软件分析悬臂箱梁的剪力滞效应^[13-17]. 然而, 关于悬臂箱梁剪力滞效应试验方面的研究仍然较少. 郭增伟等^[18-19]改进比拟杆法, 重新推导了变截面悬臂箱梁的剪力滞效应微分方程后, 利用有机玻璃模型试验结果验证算法的准确性. 卫军等^[20]以试验为主, 分析短悬臂斜拉桥主梁的正应力分布.

基于此, 本文对悬臂箱梁进行集中荷载和均布荷载的加载试验, 分析沿箱梁轴向剪力滞影响程度的变化, 以及加载形式对悬臂箱梁不同区域的剪力滞影响.

1 试验模型

试验梁由同一批次的有机玻璃粘合而成, 试验梁所采用材料的实测弹性模量为 2 370 MPa, 泊松比为 0.45; 轴向有效长度为 900 mm, 腹板厚度为 8 mm, 高度为 68 mm; 顶板设计宽度为 360 mm, 厚度为 6 mm; 底板设计宽度为 208 mm, 厚度为 6 mm. 沿箱梁轴向设置 7 个测量截面(截面 A-A~G-G), 顶板布置 22 个应变片, 底板布置 10 个应变片, 支座截面(截面 G-G)底板不布置应变片. 横截面尺寸, 如图 1 所示. 测点布置, 如图 2 所示. 箱梁纵向尺寸及应变片布置截面, 如图 3 所示.

试验采用均布荷载和集中荷载, 集中荷载为 900 N, 均布荷载为 1 kN · m⁻¹. 集中荷载采用螺杆加载, 均布荷载通过 30 N 标准砝码进行加载. 通过压力传感器测定施加的荷载, 采用 DH3816A 型静态应变采集仪进行应变采集. 试验加载简图, 如图 4 所示.

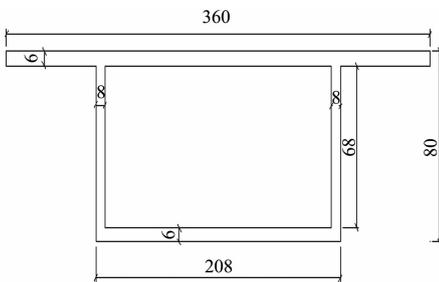


图 1 横截面尺寸(单位:mm)

Fig. 1 Cross section size (unit: mm)

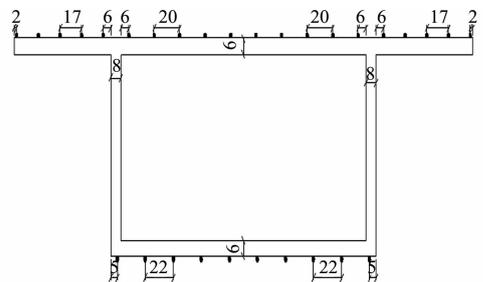


图 2 测点布置(单位:mm)

Fig. 2 Measuring points layout (unit: mm)

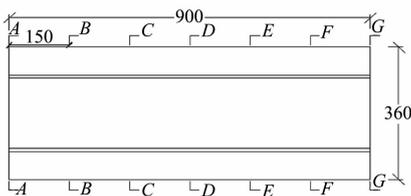
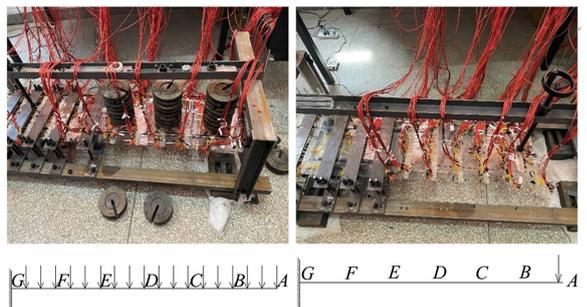


图 3 箱梁纵向尺寸及应变片布置截面(单位:mm)

Fig. 3 Box girder longitudinal dimensions and strain gauge layout section (unit: mm)



(a) 均布加载

(b) 集中加载

图 4 试验加载简图

Fig. 4 Test loading diagram

为了准确描述各截面受到的剪力滞影响, 引入剪力滞系数 λ , 即

$$\lambda = \frac{\sigma}{\sigma_0}$$

上式中: σ 为正应力试验值; σ_0 为初等梁理论的正应力计算值, 即

$$\sigma_0 = \frac{M_x}{I_x} y \tag{1}$$

式(1)中: M_x 为箱梁横截面的弯矩; I_x 为几何截面面积矩,经计算机辅助设计(CAD)软件计算,可得 $I_x=4\,841\,758.39\text{ mm}^4$; y 为箱梁截面各测点距形心轴的距离。

2 试验分析

由于截面A-A位于悬臂箱梁自由端边缘,采集的数据异常,故只对截面B-B~G-G的采集数据进行分析。

2.1 截面剪力滞分析

集中荷载作用下截面剪力滞系数,如图5所示。图5中: x 为横向位置。由图5可知:截面B-B~E-E的顶板剪力滞系数在腹板与顶板交接处最小,在顶板中间或边缘处最大,底板剪力滞系数在与腹板交接处最小,在底板中间位置最大,符合负剪力滞效应中剪力滞系数的分布规律;截面F-F,G-G的剪力滞系数在与腹板交接处最大,远离该点则逐渐减小,符合正剪力滞效应中剪力滞系数的分布规律;沿箱梁横向,截面B-B的顶板和底板剪力滞系数曲线陡峭性较大,腹板与顶板、底板交接处的剪力滞系数分别为1.221,0.837,顶板和底板中间位置的剪力滞系数分别为1.239,1.157;截面C-C~E-E顶板和底板的剪力滞系数曲线陡峭性依次减小,顶板的剪力滞系数峰值分别为1.127,1.091,1.007,谷值分别为0.921,0.933,0.962;截面E-E底板的剪力滞系数整体小于1.000,底板中间位置剪力滞系数最大值为0.995;截面F-F~G-G顶板与腹板交接处的剪力滞系数从1.006增加至1.218,顶板中间位置的剪力滞系数从0.960减小至0.865。

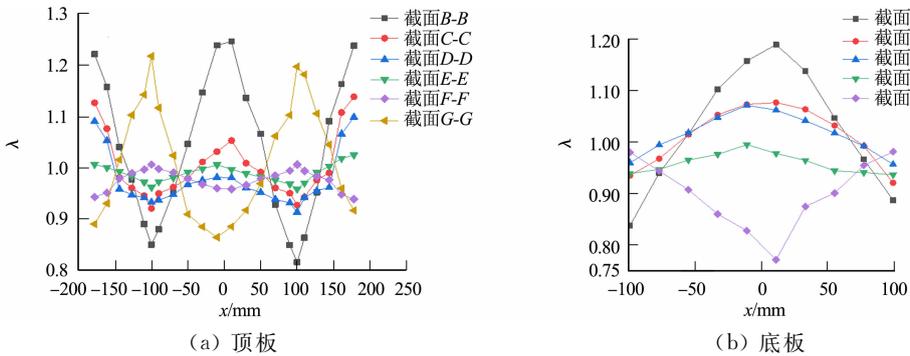


图5 集中荷载作用下的截面剪力滞系数

Fig. 5 Shear lag coefficients of section under concentrated load

由此可知,悬臂箱梁在均布荷载作用下,从自由端到固定端方向,截面受负剪力滞的影响,影响程度逐渐减小,继而受正剪力滞的影响,影响程度逐渐增加,并在固定端处达到最大,其中,负剪力滞影响区域超过全梁的2/3长度。

均布荷载作用下的截面剪力滞系数,如图6所示。由图6可知:均布荷载作用下的截面剪力滞系数的分布与集中荷载的情况相同,截面B-B~E-E受正剪力滞效应的影响,截面F-F,G-G受负剪力滞效

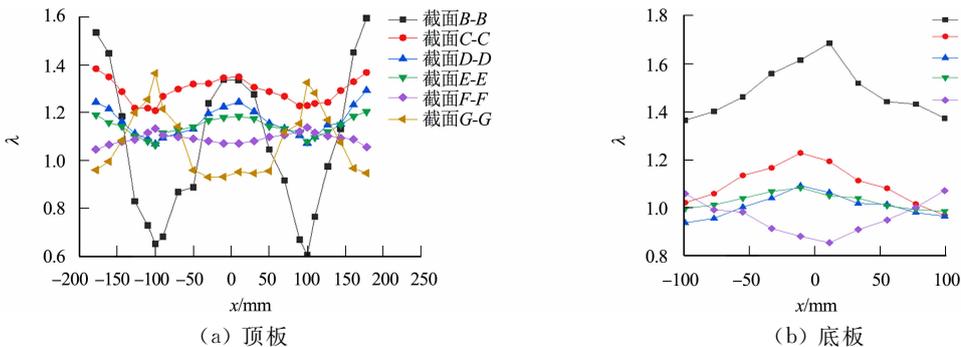


图6 均布荷载作用下的截面剪力滞系数

Fig. 6 Shear lag coefficients of section under uniformly distributed load

应的影响;截面B-B的顶板曲线陡峭性较大,顶板边缘处剪力滞系数最大值为1.595,腹板与顶板交接处剪力滞系数最小值为0.606,底板剪力滞系数整体较大,与腹板交接处剪力滞系数最小值为1.365;截

面 C-C~E-E 顶板剪力滞曲线的陡峭性较小,但剪力滞系数整体大于 1.000,截面 C-C 的剪力滞系数整体较大,顶板截面剪力滞系数最小值为 1.209,底板剪力滞系数最小值为 1.021;相较于截面 E-E,截面 D-D 的剪力滞系数较大,底板处截面 D-D,E-E 的剪力滞系数峰值接近,腹板与底板交接处,截面 D-D 的剪力滞系数较小(0.938);截面 F-F 的剪力滞系数整体大于 1.000,顶板边缘处剪力滞系数最小值为 1.047,但其曲线较为平缓,截面 G-G 的曲线较陡峭,腹板与顶板交接处剪力滞系数为 1.365.

由此可知,悬臂箱梁在均布荷载作用下,顶板区域正应力试验值大于初等梁理论的正应力计算值,靠近固定端处的悬臂箱梁受正剪力滞影响较大,靠近自由端处的悬臂箱梁受负剪力滞影响较大;沿箱梁轴向,从自由端开始,负剪力滞的影响逐渐减小,正剪力滞的影响逐渐增大,负剪力滞影响区段较大.

2.2 不同加载形式下的截面剪力滞分析

1) 截面 B-B,C-C 的剪力滞分析. 截面 B-B,C-C 的剪力滞系数,如图 7 所示. 由图 7 可知:在顶板区域,集中荷载和均布荷载作用下截面 B-B,C-C 的剪力滞系数曲线有交集,相较而言,均布荷载作用下的曲线较陡峭,峰值较大,谷值较小,均布荷载作用下截面 C-C 的剪力滞系数整体大于集中荷载;在底板区域,均布荷载作用下截面 B-B,C-C 的剪力滞系数整体大于集中荷载.

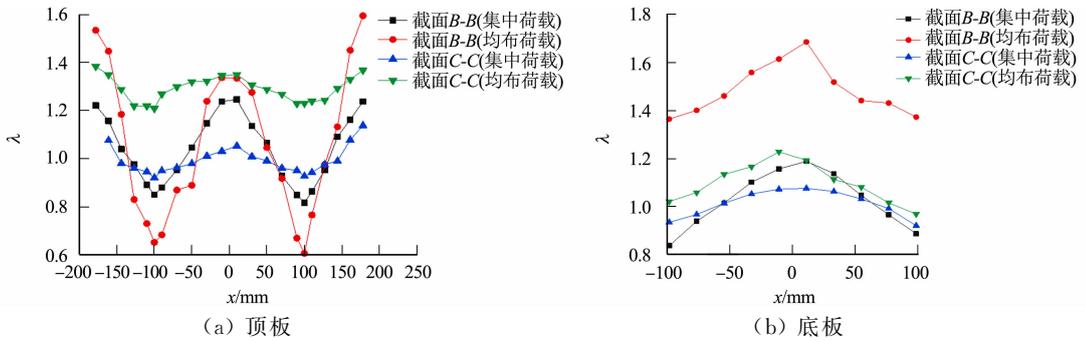


图 7 截面 B-B,C-C 的剪力滞系数

Fig. 7 Shear lag coefficients of section B-B, C-C

截面 B-B,C-C 关键点的剪力滞系数比较,如表 1 所示. 表 1 中: $\lambda_{BB,P}$, $\lambda_{BB,Q}$ 分别为集中荷载和均布荷载作用下截面 B-B 的剪力滞系数,其他截面类似; δ_{BB} 为均布荷载和集中荷载作用下截面 B-B 的剪力滞系数差值比, $\delta_{BB} = (\lambda_{BB,Q} - \lambda_{BB,P}) / \lambda_{BB,P} \times 100\%$,其他截面类似.

由表 1 可知:相较于集中荷载,均布荷载作用下截面 B-B 顶板处的剪力滞系数有增有减,顶板边缘处和中间位置分别增加了 25.66%,8.01%,与腹板交接处减小了 23.37%;截面 B-B 底板和截面 C-C 整体剪力滞系数有一定程度的增加,截面 B-B 底板增加得较为明显,底板与腹板交接处截面 B-B,C-C 分别增加了 62.98%,9.29%,底板中间位置分别增加了 39.56%,14.50%,截面 C-C 顶板与腹板交接处增加了 31.31%,顶板边缘和中间位置截面 C-C 分别增加了 22.82%,30.47%.

表 1 截面 B-B,C-C 关键点的剪力滞系数比较

Tab. 1 Comparison of shear lag coefficients at key points of section B-B, C-C

位置	x/mm	$\lambda_{BB,P}$	$\lambda_{BB,Q}$	$\delta_{BB}/\%$	$\lambda_{CC,P}$	$\lambda_{CC,Q}$	$\delta_{CC}/\%$
顶板	-178	1.221	1.535	25.66	1.127	1.384	22.82
	-144	1.040	1.185	13.88	0.981	1.288	31.36
	-100	0.850	0.652	-23.37	0.921	1.209	31.31
	-50	1.046	0.889	-15.02	0.979	1.320	34.80
	-10	1.239	1.338	8.01	1.032	1.346	30.47
底板	-11	1.157	1.615	39.56	1.073	1.228	14.50
	-55	1.015	1.461	43.92	1.015	1.135	11.84
	-99	0.837	1.365	62.98	0.935	1.021	9.29

综上所述,相较于集中荷载,悬臂箱梁靠近自由端区域在均布荷载的作用下所受到的负剪力滞影响比较大.

2) 截面 D-D,E-E 的剪力滞分析. 截面 D-D,E-E 的剪力滞系数,如图 8 所示. 图 8 中:在顶板处,均布荷载作用下截面 D-D,E-E 的剪力滞系数整体大于 1.000,集中荷载作用下截面 D-D,E-E 的剪力滞

系数则在 1.000 附近波动;在底板处,截面 D-D 均布荷载和集中荷载作用下的曲线有交集,但集中荷载作用下的峰值较小,谷值较大,均布荷载作用下截面 E-E 的剪力滞系数整体较大,集中荷载作用下剪力滞系数整体小于 1.000,未达到初等梁理论的应力计算值。

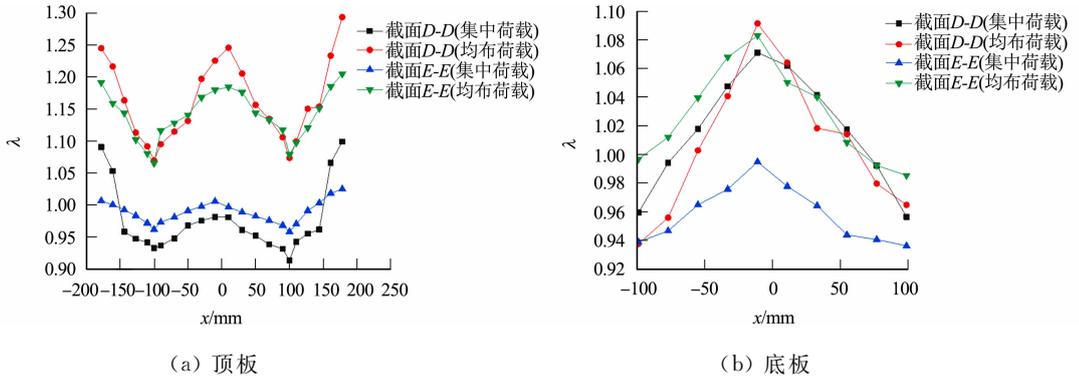


图 8 截面 D-D, E-E 的剪力滞系数

Fig. 8 Shear lag coefficients of section D-D, E-E

截面 D-D, E-E 关键点的剪力滞系数比较,如表 2 所示.由表 2 可知:相较于截面 B-B, C-C,截面 D-D, E-E 的顶板在均布荷载作用下的剪力滞系数略微增大,但差值较小,其中,相较于集中荷载,均布荷载作用下,截面 D-D, E-E 顶板边缘处的剪力滞系数分别增加了 14.13%, 18.33%, 顶板与腹板交接处的剪力滞系数分别增加了 14.66%, 10.73%, 截面 E-E 底板处的剪力滞系数的增加不超过 10%, 截面 D-D 腹板与底板交接处则减少了 2.27%。

综上所述,悬臂箱梁的中间区段与边缘区段受负剪力滞的影响一致,均布荷载作用下负剪力滞影响比较大。

表 2 截面 D-D, E-E 关键点的剪力滞系数比较

Tab. 2 Comparison of shear lag coefficients at key points of section D-D, E-E

位置	x/mm	$\lambda_{D-D,P}$	$\lambda_{D-D,Q}$	$\delta_{D-D}/\%$	$\lambda_{E-E,P}$	$\lambda_{E-E,Q}$	$\delta_{E-E}/\%$
顶板	-178	1.091	1.245	14.13	1.007	1.191	18.33
	-144	0.958	1.163	21.38	0.992	1.144	15.23
	-100	0.933	1.070	14.66	0.962	1.065	10.73
	-50	0.968	1.131	16.88	0.991	1.140	15.06
	-10	0.981	1.225	24.85	1.006	1.180	17.28
底板	-11	1.071	1.091	1.89	0.995	1.083	8.87
	-55	1.018	1.003	-1.47	0.965	1.040	7.74
	-99	0.959	0.938	-2.27	0.939	0.997	6.16

3) 截面 F-F, G-G 的剪力滞分析. 截面 F-F, G-G 的剪力滞系数,如图 9 所示。

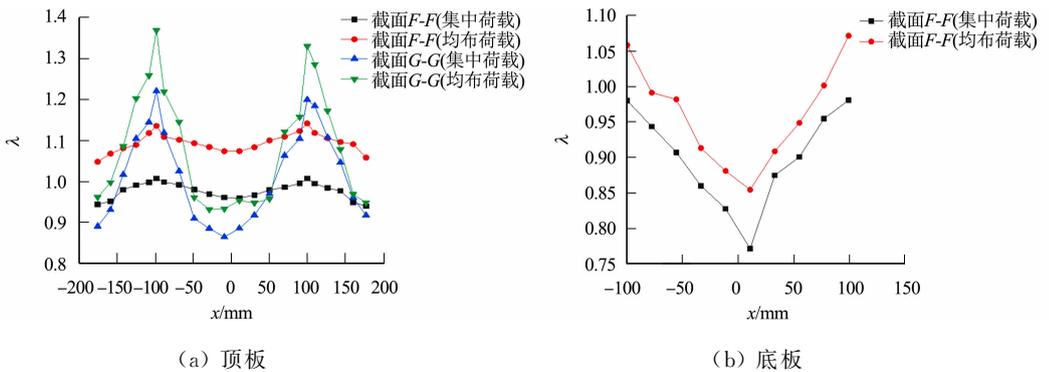


图 9 截面 F-F, G-G 的剪力滞系数

Fig. 9 Shear lag coefficients of section F-F, G-G

由图 9 可知:截面 F-F, G-G 受正剪力滞影响,均布荷载作用下截面 F-F, G-G 的剪力滞系数较大,但截面 F-F 底板和截面 G-G 顶板的剪力滞系数在 1.000 附近波动,说明正应力试验值与初等梁理论的

正应力计算值相同, 因剪力滞影响导致应力分布不均匀。

截面 $F-F, G-G$ 关键点的剪力滞系数比较, 如表 3 所示。由表 3 可知: 相较于集中荷载, 均布荷载作用下的剪力滞系数整体增大, 顶板边缘处, 截面 $F-F, G-G$ 分别增加了 10.97%, 7.91%, 顶板中间位置, 截面 $F-F, G-G$ 分别增加了 11.67%, 7.87%, 顶板与腹板交接处, 截面 $F-F, G-G$ 分别增加了 12.64%, 12.08%, 截面 $F-F$ 的底板与腹板交接处、中间位置分别增加了 8.02%, 6.45%。综上可知, 均布荷载作用下, 悬臂箱梁固定端附近产生的剪力滞影响较大。

表 3 截面 $F-F, G-G$ 关键点的剪力滞系数比较

Tab. 3 Comparison of shear lag coefficients at key points of section $F-F, G-G$

位置	x/mm	$\lambda_{FF,P}$	$\lambda_{FF,Q}$	$\delta_{FF}/\%$	$\lambda_{GG,P}$	$\lambda_{GG,Q}$	$\delta_{GG}/\%$
顶板	-178	0.943	1.047	10.97	0.890	0.961	7.91
	-144	0.979	1.079	10.27	1.016	1.084	6.75
	-100	1.006	1.133	12.64	1.218	1.365	12.08
	-50	0.979	1.092	11.48	0.910	0.960	5.57
	-10	0.960	1.072	11.67	0.865	0.933	7.87
底板	-11	0.828	0.881	6.45	—	—	—
	-55	0.907	0.982	8.27	—	—	—
	-99	0.980	1.059	8.02	—	—	—

对比截面顶板差值比可知, 均布荷载和集中荷载作用下剪力滞系数的差值比逐渐减小, 腹板与顶板交接处剪力滞系数的差值比从 -23.37% 到 12.08%, 由于正、负剪力滞系数的大小与正、负剪力滞分界点的位置、荷载形式有关^[3], 如果某种荷载作用下产生的剪力朝固定端方向增加得越快, 则正、负剪力滞系数越大, 正、负剪力滞的分界点离固定端越近。反之, 正、负剪力滞系数越小, 正、负剪力滞的分界点离固定端越远。由此可知, 集中荷载作用下正、负剪力滞的分界点离固定端较远。

2.3 负剪力滞机理分析

负剪力滞现象与正剪力滞现象都是由于同一截面处各点的剪切变形的不同而产生的。文献[21]对负剪力滞进行了解释, 在任何给定的位置, 只要沿翼缘作用并产生剪力滞效应的剪力流部分大于正剪力滞引起的剪力流的剩余部分, 就会产生负剪力滞。

在箱梁中, 由于腹板的主要作用是在箱梁顶板、底板之间传递弯曲横向力, 然而, 剪切变形的不均匀性使腹板与顶板、底板交接处的纵向位移滞后于远离板中心的纵向位移, 导致正应力在顶板和底板表面的横向分布不均匀, 正应力在腹板与顶板、底板的交接处较小, 随着远离腹板而逐渐增加, 顶板和底板中心的正应力大于交接处的正应力。同时, 根据圣维南原理, 作用力的具体分布只影响作用点附近的应力分布, 故应力向腹板两边传递时逐渐减小。在悬臂箱梁固定端处, 因为顶板、底板被完全约束, 从板边缘位置向板中心的剪力传递总是滞后的。因此, 当集中荷载和均布荷载作用于悬臂箱梁时, 各截面均产生剪力滞现象, 在离固定端一定距离处, 约束条件逐渐减弱, 剪力流强度随之减小, 由于变形协调产生了负剪力滞现象。

3 结论

1) 在集中荷载和均布荷载作用下, 悬臂箱梁均出现负剪力滞现象, 沿箱梁轴向, 从自由端开始, 箱梁受负剪力滞的影响逐渐减小, 继而出现正剪力滞现象, 且影响程度逐渐增大, 在固定端处达到最大。同时, 在均布荷载作用下, 箱梁截面 $C-C$ 至截面 $F-F$ 区段产生的正应力试验值大于初等梁理论的正应力计算值。

2) 在集中荷载和均布荷载作用下, 对悬臂箱梁的剪力滞影响进行比较。相较于集中荷载, 均布荷载作用下的悬臂箱梁受剪力滞影响较大, 从自由端开始, 均布荷载和集中荷载作用下的剪力滞系数差值比逐渐减小。

参考文献:

[1] 张士铎, 邓小华, 王文明. 箱形薄壁梁剪力滞效应[M]. 北京: 人民交通出版社, 1998.

- [2] 郑威,曾刚,董毓利,等.集中荷载下钢筋混凝土简支T型梁剪力滞效应[J].华侨大学学报(自然科学版),2020,41(6):707-717. DOI:10.11830/ISSN.1000-5013.202008005.
- [3] 张士铎,王文州.桥梁工程结构中的负剪力滞效应[M].北京:人民交通出版社,2004.
- [4] 李小龙,翟昊.箱梁剪力滞效应研究方法综述[J].价值工程,2018,37(23):284-285.
- [5] 陈杨.箱梁剪力滞效应研究现状[J].四川建筑,2020,40(1):208-209,214. DOI:10.3969/j.issn.1007-8983.2020.01.071.
- [6] 段燕娥,张元海.边界条件对箱梁剪力滞效应的影响[J].兰州工业学院学报,2021,28(2):1-6.
- [7] 卢海林,蔡恒,杨宏印,等.悬臂曲线箱梁负剪力滞效应[J].土木工程与管理学报,2017,34(5):22-26,45. DOI:10.3969/j.issn.2095-0985.2017.05.004.
- [8] 何志刚,蔺鹏臻.考虑截面配筋的变截面悬臂箱梁剪力滞效应研究[J].铁道科学与工程学报,2017,14(10):2154-2161. DOI:10.3969/j.issn.1672-7029.2017.10.017.
- [9] 林丽霞,丁南宏,吴亚平,等.简支及悬臂箱梁在角隅轴向荷载作用下的翼板纵向应力[J].计算力学学报,2019,36(3):401-406. DOI:10.7511/jslx20180203001.
- [10] 张元海,白昕,林丽霞.箱型梁剪力滞效应的改进分析方法研究[J].土木工程学报,2012,45(11):153-158.
- [11] 周月娥,符兴义,李琦.集中荷载作用下悬臂箱型梁剪力滞效应解析分析[J].建筑科学,2017,33(9):1-6. DOI:10.13614/j.cnki.11-1962/tu.2017.09.001
- [12] 吴贺贺.薄壁悬臂箱梁的剪力滞问题研究[J].山西建筑,2018,44(4):180-181.
- [13] 余必龙.基于最小势能原理薄壁悬臂箱梁的剪力滞问题研究[J].佳木斯大学学报(自然科学版),2017,35(2):199-201. DOI:10.3969/j.issn.1008-1402.2017.02.007.
- [14] 汪永强.变截面悬臂箱梁剪力滞效应研究[J].北方交通,2020(10):11-14. DOI:10.15996/j.cnki.bfjt.2020.10.003.
- [15] 潘旦光,付相球,韦杉杉,等.变高度悬臂箱梁剪力滞效应的半解析解[J].工程力学,2018,35(9):207-213. DOI:10.6052/j.issn.1000-4750.2017.08.0643.
- [16] ZHU Li,SU R K L,LI Mingjie. Finite beam element with 26 DOFs for curved composite box girders considering constrained torsion, distortion, shear lag and biaxial slip[J]. Engineering Structures,2021,232(1):111797. DOI:10.1016/j.engstruct.2020.111797.
- [17] HE Xiaoyang,XIANG Yiqiang,CHEN Zhengyang. Improved method for shear lag analysis of thin-walled box girders considering axial equilibrium and shear deformation[J]. Thin-Walled Structures,2020,151:106732. DOI:10.1016/j.tws.2020.106732.
- [18] 郭增伟,李龙景,张俊波.变截面悬臂箱梁剪力滞效应的比拟杆分析方法[J].土木工程学报,2019,52(8):72-80.
- [19] 郭增伟,李龙景,张俊波.考虑翼板承托构造的箱梁剪力滞效应分析方法[J].北京工业大学学报,2020,46(3):253-259. DOI:10.11936/bjutxb2018090005.
- [20] 卫军,黄敦文,晏辉煌,等.短悬臂斜拉桥主梁正应力分布试验研究[J].土木工程学报,2017,50(1):70-74,81.
- [21] LEE S C,YOO C H,YOON D Y. Analysis of shear lag anomaly in box girders[J]. Journal of Structural Engineering,2002,128(11):1379-1386.

(责任编辑:钱筠 英文审校:方德平)