

DOI:10.16799/j.cnki.esdqyfh.2022.05.023

预应力混凝土连续刚构桥剪力滞效应分析

李云虎, 李一鸣, 潘 诚, 姚鹏飞

(中国市政工程中南设计研究总院有限公司, 湖北 武汉 430010)

摘 要: 针对连续刚构桥悬臂施工过程中的实测数据出现的剪力滞现象,为了解决施工监控常用的空间杆系单元模型不能有效地反映并且计算实际施工过程中箱梁截面上的剪力滞效应的问题,对连续刚构桥悬臂施工阶段的荷载工况进行简化,给出各简化荷载工况对应的简化计算模型,推导各简化计算模型的剪力滞系数的计算公式,并通过计算公式计算施工过程中的箱梁截面应力与实测值对比。对比结果显示,通过简化计算模型计算得到的箱梁截面应力值相较实际值误差较小,在实际工程中具有一定的应用价值。

关键词: 连续刚构桥;剪力滞;应力监测;简化计算;箱梁

中图分类号: U448.23

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2022)05-0088-05

0 引 言

连续刚构桥因其墩梁固结且结构连续的特点,在保留了连续梁无伸缩缝、行车平顺的优点的同时无须设立支座及进行结构转换^[1],在现代桥梁工程中得到了广泛的应用。连续刚构桥的主梁截面大多采用箱型截面。

对于腹板间距较大的单室宽箱梁,在弯曲变形时,上下翼板由于剪切变形的影响已不服从初等梁理论弯曲变形的平截面假定。由于翼缘的剪切变形导致对称荷载弯曲引起的法向应力呈非均匀分布状态,即剪力滞后现象,尤其是很多宽高比、宽跨比突出的桥梁,剪力滞效应非常严重^[2-3]。在实际的施工监控中,一般采用 Midas Civil 等空间杆系有限元分析软件监控连续刚构桥的仿真分析,但空间杆系单元模型由于其自身特点的限制,无法有效地反映并且计算实际施工过程中箱梁截面上的剪力滞效应^[4-5]。因此,有必要对连续刚构桥悬臂施工阶段的荷载工况进行简化,并提出对应的剪力滞系数的简化计算模型。通过计算得到的剪力滞系数与初等梁理论计算得到的箱梁截面应力相乘,得到悬浇段箱梁截面在悬臂施工过程中的实际应力,从而对施工过程中的主梁应力状态实现更为精确、安全的控制。

1 工程概况

工程实例的混凝土连续刚构桥为三跨设计,跨径设计为(66+120+66)m,全长 252 m。主梁上部结

构采用双向预应力单箱单室箱梁,分为两幅施工,并设置 2%的横坡便于排水。大桥的总体布置如图1所示。

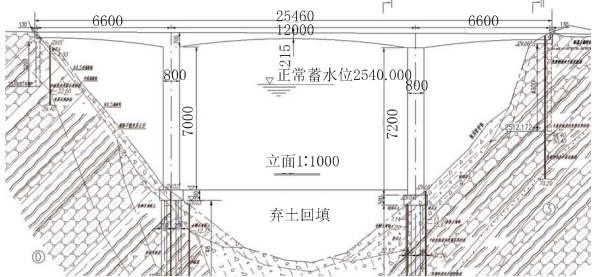


图1 连续刚构实桥立面图(单位:cm)

连续刚构桥的主梁采用变截面连续梁,梁高由墩底的 7 m 至跨中的 2.75 m 以 1.8 次抛物线的形式进行过渡。该连续刚构桥采用悬臂浇筑方式进行浇筑,每个最大悬臂段被划分为 7×3 m 及 8×4 m 共 15 个悬浇段,每个悬浇段均按照挂篮移动→定位立模→绑扎钢筋→悬臂浇筑→预应力张拉→挂篮移动至下一悬浇段的施工工序进行施工。

2 主梁应力监测结果

2.1 测点布置

在该工程实例的连续刚构桥施工期间,为了对主梁的受力状态进行监测,根据连续刚构桥悬臂施工的受力特点,在中跨的根部和 L/4 截面布置了应力测点,主梁的应力控制截面和控制截面上的测点布置如图 2、图 3 所示。应力测点上的传感器采用金码高新传感器系统销售有限公司开发的 ZX-215 型埋入式智能弦式数码应变计,通过测得应变计所在位置的应变,计算得到相应的应力。

2.2 应力观测结果

在连续刚构桥施工过程中,各悬浇段挂篮移动,

收稿日期: 2021-08-09

作者简介: 李云虎(1983—),男,本科,高级工程师,从事道路桥梁设计工作。

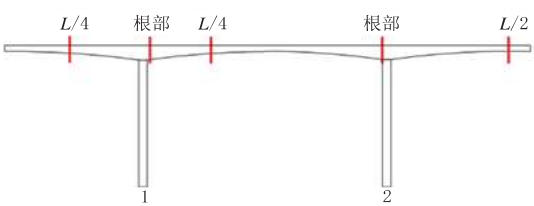


图 2 主梁应力控制截面

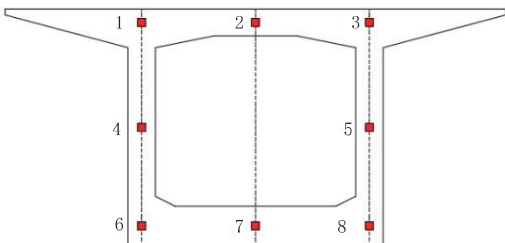


图 3 箱梁测点布置图

浇筑混凝土和预应力张拉关键工序施工结束后,对控制截面上的应力测点数据进行采集。表 1 列出了 1 号墩主跨根部截面在各悬浇段预应力张拉后的应力测点数据。

表 1 1 号墩主跨悬臂浇筑施工阶段根部截面应力数据 单位:MPa

悬臂 段浇 筑	底板			腹板		顶板		
	6	7	8	4	5	1	2	3
1	-0.51	-0.37	-0.42	-1.23	-0.98	-1.44	-0.79	-1.21
2	-0.89	-0.62	-0.92	-2.71	-2.33	-2.80	-2.29	-2.76
3	-0.84	-0.66	-0.82	-2.64	-2.59	-3.45	-2.44	-3.63
4	-1.03	-0.76	-0.93	-2.91	-2.86	-5.36	-3.49	-4.97
5	-0.97	-0.66	-0.87	-3.02	-3.07	-6.13	-5.03	-6.01
6	-1.15	-0.69	-1.08	-3.13	-3.25	-6.76	-5.51	-6.66
7	-1.43	-0.39	-1.22	-3.83	-4.59	-8.77	-7.57	-8.62
8	-2.34	-0.72	-1.95	-4.41	-5.67	-9.73	-9.68	-9.84
9	-3.61	-3.43	-3.72	-6.86	-7.08	-10.91	-10.58	-10.91
10	-4.59	-4.81	-4.55	-7.42	-7.33	-10.84	-10.82	-11.69
11	-5.27	-5.04	-4.52	-7.79	-8.39	-12.71	-12.51	-12.62
12	-5.66	-6.39	-5.91	-8.27	-8.47	-12.51	-12.13	-12.92
13	-8.13	-8.09	-7.66	-9.38	-9.17	-11.95	-12.11	-11.47
14	-8.57	-9.11	-9.39	-10.14	-10.37	-10.29	-10.46	-11.14
15	-11.10	-10.89	-11.37	-10.67	-10.46	-10.21	-9.68	-9.79

从主跨根部的应力监测数据可以发现,根部截面的顶板与底板存在明显的剪力滞效应,底板的腹板位置的两个测点(6 和 8)在各悬浇段施工结束后的应力要大于中间测点(7)的应力值,顶板的腹板位置的对应测点(1 和 3)的应力也要大于中间测点(2)的应力值。为了更直观地对应力数据进行分析,分别绘制顶板和底板测点应力随着悬浇段浇筑完成的变化曲线,如图 4、图 5 所示。

由图 4 可知,在整个悬臂施工阶段,顶板的 3 个

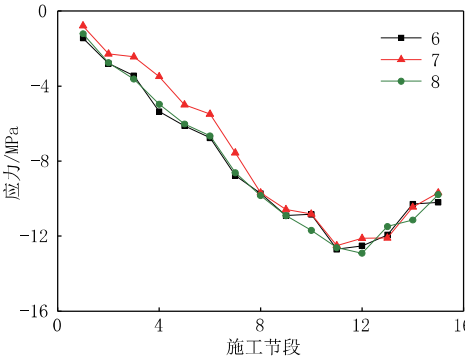


图 4 顶板测点应力随悬臂段浇筑变化值

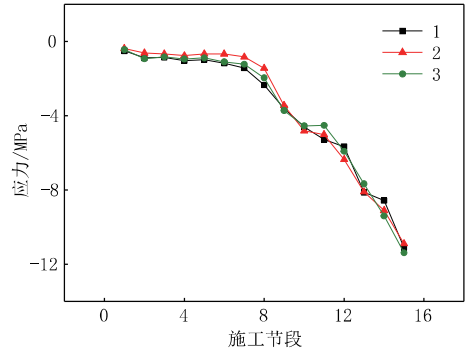


图 5 底板测点应力随悬臂段浇筑变化值

测点均处于受压状态,顶板存在明显的正剪力滞效应,即腹板上方的两个测点(1 和 3)的压应力在悬臂浇筑初期要明显大于顶板中间测点(2)的压应力^[6]。而随着悬臂施工的进行,悬臂梁的宽跨比随着最大悬臂长度的增大而不断减小,剪力滞效应随之减弱,顶板 3 个测点的压应力逐渐趋于一致。这同剪力滞效应随宽跨比变化的规律相吻合^[7-8]。

与顶板的应力分布规律和应力变化规律相似,底板的 3 个测点在悬臂浇筑初期同样存在着明显的正剪力滞效应,腹板下方测点的压应力要大于底板中间测点的压应力值,剪力滞效应同样随着宽跨比的减小不断减弱。

3 悬臂施工阶段剪力滞效应分析

在实际的施工监控中,一般会使用有限元分析软件对施工监控的桥梁进行有限元仿真分析,计算各施工阶段的结构内力和变形,并根据计算结果对施工进行指导。但是施工监控一般采用空间杆系单元模型进行建模。空间杆系单元模型由于其自身特点的限制无法有效地反映并且计算实际施工过程中箱梁截面上的剪力滞效应,而建立实体单元模型则需要耗费大量的时间和计算资源,不利于实时的计算监控。因此,有必要对连续刚构桥悬臂施工阶段的荷载工况进行简化,并提出对应的剪力滞系数的简化计算模型,从而在空间杆系单元计算的初等梁理

论的应力基础上,考虑剪力滞系数得到主梁的实际应力,对施工过程中的主梁应力状态实现更为精确、安全的控制。

3.1 悬臂施工阶段的剪力滞系数计算

悬臂浇筑施工一般为挂篮移动、混凝土浇筑和预应力张拉3个施工工序的不断循环,每一个悬浇段都必然受到挂篮荷载、混凝土湿重荷载和预应力荷载3个荷载工况的作用。因此,计算连续刚构桥悬臂阶段任一截面的剪力滞系数,就需要对上述3个荷载工况和已浇筑悬浇段的自重及预应力进行简化,依据各简化模型计算各自荷载工况下的剪力滞系数,最后进行荷载工况的叠加。

其中,挂篮及混凝土湿重的荷载工况均可以简化为悬臂梁自由端作用集中荷载及附加弯矩的简化计算模型,如图6中的(a)、(b)所示。

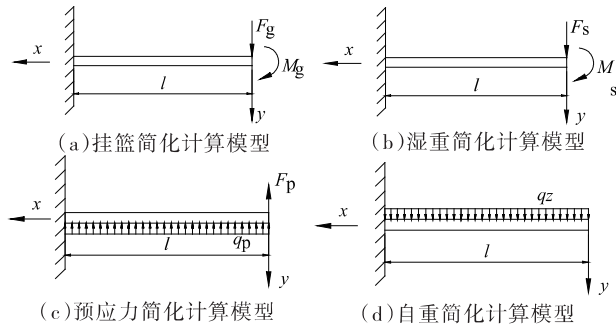


图6 悬臂施工阶段不同荷载工况简化模型的计算简图

悬浇段的预应力荷载工况则可以简化为悬臂梁自由端作用集中荷载以及悬臂梁承受均布荷载的简化计算模型,如图6中(c)所示。

已浇筑梁段的自重和预应力则用悬臂梁作用均布荷载的简化计算模型[见图6(d)]来进行剪力滞的求解。

需要注意的是,在挂篮湿重和预应力荷载工况的简化计算模型中存在着附加弯矩,但是附加弯矩并不会引起剪力滞效应,各荷载工况的简化计算模型只需考虑集中荷载和均布荷载即可^[9]。所有荷载工况的计算都基于悬臂梁自由端施加集中荷载和悬臂梁承受均布荷载两种基本计算模型。例如湿重引起的剪力滞系数的计算就单独采用悬臂梁自由端承受集中荷载的模型,而预应力荷载引起的剪力滞系数,只需将悬臂梁自由端承受集中力引起的剪力滞系数与悬臂梁承受均布荷载引起的剪力滞系数进行叠加即可。因此,只需对悬臂梁自由端承受集中荷载作用和悬臂梁承受均布荷载作用两个计算模型下的剪力滞系数进行推导,即可求出各荷载工况下的剪力滞系数。

3.2 悬臂梁自由端受集中荷载作用下的剪力滞系数计算

悬臂梁自由端受集中荷载作用的计算图示如图7所示。下面进行相应截面剪力滞系数计算公式的推导^[10-11]。

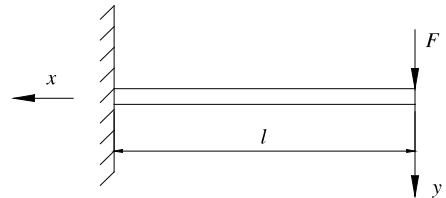


图7 悬臂梁自由端受集中荷载作用的计算图示
悬臂梁承受如图7所示的集中力F,则:

$$M(x) = -Fx, Q(x) = -F \quad (1)$$

其对应的微分方程表达式为:

$$u'' - k^2 u = \frac{11nF}{10EI} \quad (2)$$

上式的通解为:

$$u = \frac{11nF}{10EI} (C_1 \sinh kx + C_2 \cosh kx + \frac{1}{k^2}) \quad (3)$$

通过边界条件 $u'|_{x=0}=0, u|_{x=l}=0$ 可以将式(3)简化为:

$$u' = \frac{11nF}{10EI} (kC_1 \sinh kx + kC_2 \cosh kx)$$

又有当 $x=0, C_1=0; x=l$ 时,

$$u = -\frac{11nF}{10EI} (C_2 \cosh kl + \frac{1}{k^2})$$

求得 $C_2 = -\frac{1}{k^2 \cosh kl}$ 。

将求得的参数代入式(3)则有:

$$u = -\frac{11nF}{10EI} (1 - \frac{\cosh kx}{\cosh kl}) \quad (4)$$

假定箱梁的纵向位移函数为五次函数,顶板的纵向应力为:

$$\sigma_x = \frac{h_i}{I} [M(x) + \frac{11nF}{10k} (1 - \bar{y}^5 - \frac{5I_s}{6I}) \frac{\cosh kx}{\cosh kl}] \quad (5)$$

悬臂根部的截面,则此处的纵向应力为:

$$\sigma_l = \pm \frac{Flh_i}{I} [1 - (1 - \bar{y}^5 - \frac{5I_s}{6I}) \frac{11n}{10kl} \tanh kl] \quad (6)$$

悬臂根部的截面的剪力滞系数为:

$$\lambda = 1 - (1 - \bar{y}^5 - \frac{5I_s}{6I}) \frac{11n}{10kl} \tanh kl \quad (7)$$

3.3 悬臂梁受均布荷载作用的剪力滞系数计算

悬臂梁承受均布荷载作用的计算图示如图8所示。下面进行相应截面剪力滞系数计算公式的推导^[10-11]。

悬臂梁承受如图8所示的均布荷载,则有:

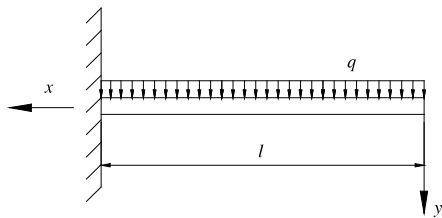


图 8 悬臂梁受到均布荷载作用的计算图示

$$M(x)=-\frac{1}{2}qx^2, Q(x)=-qx \quad (8)$$

其对应的微分方程表达式为:

$$u''-k^2u=\frac{11nqx}{10EI} \quad (9)$$

式(9)的通解为:

$$u=\frac{11nq}{10EI}\left(C_1shkx+C_2chkx+\frac{x}{k^2}\right) \quad (10)$$

通过边界条件 $u'|_{x=0}=0, u|_{x=l}=0$ 可以求出式(10)

中的 $C_1=-\frac{1}{k^3}, C_2=-\frac{shkl-kl}{k^3chkl}$ 。

将求得的参数代入式(10)则有

$$u=-\frac{11nq}{10EI}\left[-\frac{1}{k}shkx+\left(\frac{1}{k}thkl-\frac{1}{chkl}\right)chkx+x\right] \quad (11)$$

由此可求得由剪力滞所产生的附加弯矩:

$$M_F=-\frac{11nI_sq}{12k^2I}\left[1-chkx+\left(thkl-\frac{kl}{chkl}\right)shkx\right] \quad (12)$$

假定箱梁的纵向位移函数为五次函数,顶板的纵向应力为:

$$\sigma_x=\pm\frac{qh_i}{I}\left[-\frac{1}{2}x^2-\frac{11n}{10k^2}\left(1-\bar{y}^5-\frac{5I_s}{6I}\right)\left(1-\frac{klshkx+chk(l-x)}{chkl}\right)\right] \quad (13)$$

悬臂根部截面的剪力滞系数为:

$$\lambda=1-\frac{11I_sn}{6Ik^2I^2}\left(1-\frac{1+klshkl}{chkl}\right) \quad (14)$$

4 剪力滞计算公式算例分析

第 3 节对悬臂施工阶段悬浇段的各荷载工况进行了相应的简化,并给出了对应的剪力滞系数计算模型和计算公式。

本节利用前述的简化计算模型计算工程实例 8 号悬浇段预应力张拉后的根部截面的正应力。

在对 8 号悬浇段剪力滞系数进行计算时,首先依据荷载工况的特点将荷载工况分为当前悬浇段的荷载工况和已浇筑悬浇段的荷载工况。其中,当前悬浇段荷载工况包括挂篮荷载工况、湿重荷载工况和预应力张拉荷载工况。已浇筑悬浇段荷载工况包括已浇筑悬浇段的自重和已张拉的预应力。这是因为

这两个荷载工况所对应的悬臂梁长度不同,因此需要分别进行计算后再叠加。

首先对当前悬浇段的荷载工况进行计算。将变截面梁等效为如图 9 所示的等截面梁,8 号悬浇段施工后的悬臂梁长度 $l_2=25\text{ m}$ 。

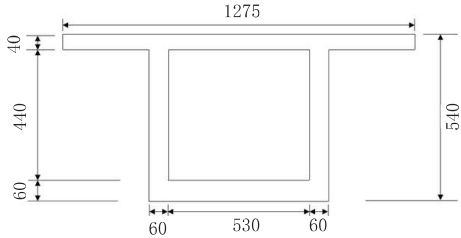


图 9 等效等截面梁尺寸图

由截面参数可以计算得到:

$$I_s=17.271\text{ m}^4, I_\omega=2.923\text{ m}^4$$

$$I=I_s+I_\omega=17.271+2.923=20.194\text{ m}^4$$

$$n=\frac{1}{1-\frac{11}{12}\frac{I_s}{I}}=4.632\text{ m}^4$$

$$k=\frac{1}{b}\sqrt{\frac{11}{3}\frac{Gn}{E}}=0.473\text{ m}^4$$

$$\lambda=1-\frac{11I_sn}{6Ik^2I^2}\left(1-\frac{1+klshkl}{chkl}\right)=1.125$$

根据初等梁理论,分别计算悬臂梁在挂篮、湿重和预应力荷载工况下的根部截面顶板 1 号测点的应力值,然后分别与对应的剪力滞系数结合,最终得到考虑剪力滞效应后的箱梁根部截面顶板 1 号块应力计算值,计算结果见表 2。

表 2 8 号悬浇段顶板 1 号测点应力计算结果 单位:MPa

荷载工况	剪力滞系数	初等梁理论	考虑剪力滞
1~7 号块自重	1.125	2.491	2.803
1~7 号块预应力	1.125	-10.738	-12.101
8 号挂篮	1.231	0.481	0.592
8 号块湿重	1.231	0.412	0.516
8 号块预应力	1.231	-1.321	-1.627
	1.088	-0.901	-0.979
计算值	—	-9.589	-10.818

从表 2 可以看出,通过各荷载工况考虑剪力滞系数叠加得到的 1 号测点应力值,要大于初等梁理论计算得到的 1 号测点应力值,将 8 号悬浇段预应力张拉后的 1 号测点实测值与计算值进行对比,比较结果见表 3。

表 3 1 号测点应力实测值与计算值对比

计算值	实测值	误差值	误差百分比/%
-10.818	-9.843	-0.975	9.83

由表3可以看出,通过简化模型计算并最终累加得到的应力计算值与实测值较为接近,误差百分比为9.83%,在10%以内。因此,在实际的施工过程中,当需要对剪力滞效应进行考虑时,可以依据本文的简化模型方法,对荷载工况进行简化并分别计算相应的剪力滞系数,然后通过将各自荷载工况下的初等梁理论的应力与剪力滞系数相乘并进行叠加,得到与实际结果较为接近的考虑剪力滞效应的应力值。

5 结 论

(1)连续刚构桥箱梁截面的顶板和底板在悬臂施工过程中存在着明显的正剪力滞效应。但随着悬臂施工的进行,悬臂梁的宽跨比随着最大悬臂长度的增大而不断减小,剪力滞效应随之减弱。

(2)针对施工阶段实测数据中发现的剪力滞现象,本文对连续刚构桥悬臂施工阶段的各荷载工况进行了简化,并给出了对应的简化计算模型,推导了各简化计算模型的剪力滞系数的计算公式。

(3)利用悬臂荷载工况剪力滞的简化模型计算了8号悬浇段施工过程中悬臂根部截面1号测点的应力并与实测值进行对比。

根部截面1号测点的应力计算值与施工过程中的应力实测值较为接近,误差百分比为9.83%,在10%以内,计算模型具有一定的精准度。

参考文献:

- [1] 杨颂,李涛.大跨径连续刚构桥箱梁悬臂施工阶段剪力滞效应分析[J].公路交通技术,2012(4):82-84.
- [2] 李兴坤,郭凯,周世军.连续刚构箱梁剪力滞效应分析[J].河南城建学院学报,2012,21(4):8-10.
- [3] 周朋,蔺鹏臻.变截面连续箱梁剪力滞分析的有限梁段法[J].铁道科学与工程学报,2018,15(4):948-955.
- [4] 周世军,江瑶,吴云丹,等.考虑滑移和剪切变形的单箱双室组合箱梁剪力滞效应[J].土木建筑与环境工程,2017,39(3):20-27.
- [5] 唐怀平,唐达培.大跨径连续刚构箱梁剪力滞效应分析[J].西南交通大学学报,2001,36(6):617-619.
- [6] 蔡恒,卢海林,汤正.基于板壳有限元理论的薄壁箱梁剪力滞效应[J].铁道科学与工程学报,2017(4):116-123.
- [7] 曲慧明.宽箱梁剪力滞效应分析[D].重庆:重庆交通学院,2003.
- [8] 司徒毅,肖金军,罗旗帜,等.连续刚构桥主梁基于势能变分原理的剪力滞效应研究[J].世界桥梁,2011(6):42-45.
- [9] 吴文清,叶见曙,杨效中,等.薄壁箱梁剪力滞效应研究理论的若干问题讨论[J].桥梁建设,2001(6):53-57.
- [10] 丁南宏,林丽霞,钱永久.变截面箱梁剪力滞及剪切变形效应近似计算方法[J].铁道科学与工程学报,2011(1):14-18.
- [11] 张玉元,张元海,张慧.箱形梁剪力滞效应的分离求解方法及参数影响分析[J].应用数学和力学,2018,39(11):1282-1291.

《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴,为您提供平台,携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

投稿网站:<http://www.csdqyfh.com> 电话:021-55008850 联系邮箱:cdq@smedi.com