

基于桥面板疲劳计算的多箱室钢桥横隔板设置

何文杰, 崔立川

(中交公路规划设计院有限公司, 北京市 100088)

摘要: 结合实际设计项目, 考虑桥位腐蚀环境和跨铁路因素的特殊要求, 从钢箱梁顶板疲劳验算的角度, 计算分析横隔板数量对顶板疲劳应力幅的影响, 从而为同类项目优化横隔板数量提供参考方法。

关键词: 钢桥; 桥面板疲劳; 横隔板; 耐久性

中图分类号: U442

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2021)08-0148-04

0 引言

桥梁设计时, 应遵从实用、经济、安全、美观等原则。钢结构桥梁具有自重轻、跨越能力大和施工快捷等优点, 但其存在抗疲劳和耐久性能力缺陷。

本文结合实际项目, 考虑桥位处于强腐蚀性环境区域且上跨运营铁路, 桥梁上部结构采用钢箱梁设计。针对耐久性, 钢箱梁截面采用特殊设计; 针对抗疲劳性, 梁片间设置外露横向贯通横隔板, 但外露横隔板不利于梁体耐久性和施工作业时间, 但减少(或取消)横向贯通横隔板, 本文根据梁间顶板纵向连接焊缝抗疲劳验算来优化横隔板数量, 以期同类项目设计提供参考方法。

1 工程概况

本项目公路等级为一级公路, 设计车速 80 km/h, 与既有铁路交叉, 斜交角度 66°, 桥梁采用 48 m+48 m 2 跨跨越铁路。为减少施工期对铁路的影响, 上部结构采用连续钢箱梁结构, 钢主梁采用工厂分节段预制, 节段间采用工地现场焊接。

全桥分幅设计, 单幅桥面宽度 12.5 m, 横断面设置 3 片斜腹板箱梁, 梁高 2.2 m, 梁片间通过顶板焊接成为整体截面。下部结构采用 Y 型柱式墩, 墩身采用圆形截面; 基础形式采用承台群桩基础。

钢箱梁横断面见图 1。

2 横隔板分析

本项目位于强腐蚀性环境区域, 上跨运营铁路。

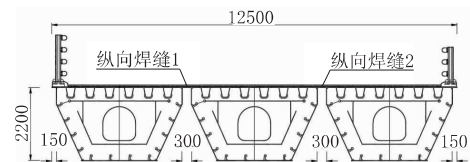


图1 钢箱梁横断面(单位:mm)

为减少施工期间箱外焊接工作量和便于后期耐久性维护, 单片主梁箱室采用全封闭式设计, 箱外不设置加劲肋, 无悬臂翼缘板, 每隔固定间距设置 1 道单箱箱内横隔板。

设计初期, 在梁端支座处, 设置横向贯通横隔板将 3 片主梁连为整体; 在梁跨间处, 通过箱梁外伸顶板间的纵向对接焊缝将 3 片主梁连为整体, 顶板连接段宽 30 cm。

在汽车荷载作用下, 3 片主梁各自的挠度变形对顶板的纵向焊缝应力影响较大。因此, 在满足主梁总体计算要求的前提下, 研究优化梁跨间的横向贯通横隔板设置数量, 对本项目尤为重要。

横向贯通横隔板能将各主梁相互连接, 增强梁体整体刚度, 扩散桥面荷载分布, 避免单梁荷载过于集中从而加大单梁的负担。因此, 总体计算时, 可根据增减横隔板数量, 通过数值模拟分别对主梁进行计算, 分析各构件受力即可, 本文不作研究。

由以上分析可知, 横隔板能提高上部结构整体刚度, 减小顶板连接段应力的变化幅度(即疲劳应力幅)。因此, 可通过主梁间的连接顶板及其纵向焊缝的疲劳验算, 来优化横向贯通横隔板的设置数量。

3 顶板疲劳分析计算

3.1 基本概念

疲劳破坏是指在荷载反复作用下, 结构构件母材和连接缺陷处或应力集中部位形成微细的疲劳裂纹,

收稿日期: 2021-01-05

作者简介: 何文杰(1984—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事桥梁设计工作。

并逐渐扩展以至最后断裂的现象。它是一个累积损伤过程,破坏时材料名义应力远低于其屈服强度。

焊接钢材在施焊时产生明显的局部温差,随着冷却时间的增加,焊缝处的温度由表向内逐渐降低,构件内部存在不均匀温度场。基于材料热胀冷缩原理,先后冷却的两部分钢材之间存在变形约束效应,先冷却部分被后冷部分被动压缩,后冷却部分的自由收缩受限,从而产生最终的残余应力(见图 2)。

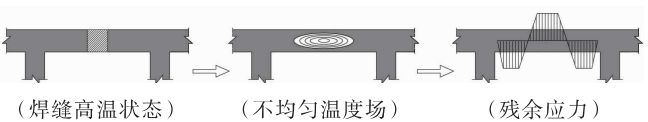


图 2 焊缝残余应力过程示意

因此,在外荷载作用下,钢材应力比对疲劳影响不大,而应力幅起主要作用。疲劳计算方法应按基于名义应力的容许应力幅法^[1]。

影响结构疲劳破坏的主要因素包括结构细部构造、连接型式、应力循环次数、最大应力值和应力变化幅度(应力幅)。根据幅值变化规律,疲劳可分为等幅疲劳和变幅疲劳。

3.2 计算模型及荷载

(1)计算模型:采用有限元程序,按板单元分别建立 2 个整梁模型,即主梁跨间无横向贯通横隔板模型(以下简称“分离式模型”)和主梁跨间有横向贯通横隔板模型(单跨设置 3 道)(以下简称“横梁式模型”)。主墩支座施加横纵向位移约束,过渡墩支座释放纵向约束,所有支座均释放弯矩约束。

(2)网格划分:板单元采用 4 边形网格划分,网格尺寸从上至下逐渐变大,顶板及 U 肋单元尺寸取 150 mm,上腹板及横隔板取 300 mm,其他构件取 900 mm(见图 3)。

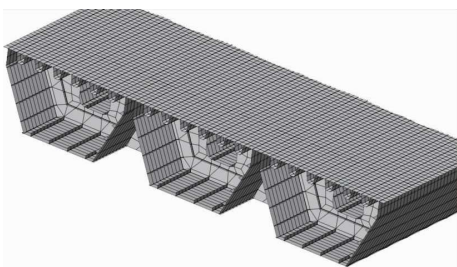


图 3 模型网格示意

(3)荷载:关于汽车荷载,疲劳荷载计算模型Ⅲ用于计算正交异性钢桥面板,其考虑了轮载的横向位置,适用于局部模型的影响面布载。本文计算目标是主梁间的顶板连接纵缝,因此采用疲劳荷载计算模型Ⅰ。根据公路钢结构桥梁设计规范,疲劳荷载计算模型Ⅰ采用等效车道荷载,且考虑多车道的影响^[2]。

本桥单幅采用 3 车道布置,内侧 2 车道各宽 3.75 m,外侧车道宽 3.5 m(见图 4)。

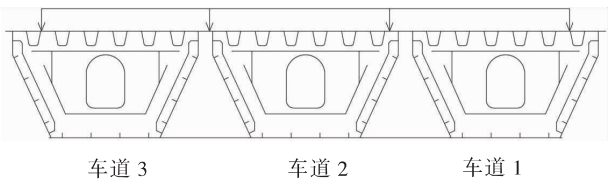


图 4 车道横向布置示意

结合公路桥涵设计通用规范^[3],单车道荷载计算等效值为 $P_k=249.2\text{ kN}$, $q_k=3.15\text{ kN/m}$ 。内车道计算面荷载为 1.532 kN/m^2 ,外车道面荷载为 1.642 kN/m^2 ,共考虑 7 种荷载工况(见表 1)。

表 1 荷载工况一览表

工况编号	工况内容
1	恒载
2	恒载 + 车道 1
3	恒载 + 车道 1 + 车道 2
4	恒载 + 车道 1 + 车道 2 + 车道 3
5	恒载 + 车道 2
6	恒载 + 车道 2 + 车道 3
7	恒载 + 车道 3

3.3 疲劳应力幅验算

3.3.1 计算依据

关于疲劳计算,欧洲规范是按双对数坐标上等间距的规则布置疲劳细节数值,其规范在编制时,搜集了大量钢结构疲劳试验的数据,并根据这些数据落于疲劳曲线上的位置来确定对应构造物分类(或连接)的细节类别^[2]。

公路钢结构桥梁设计规范借鉴了欧洲规范中的曲线,但将各个细节类别的数值向下调整到 5 的整数倍,且正应力幅疲劳强度曲线由双对数坐标系下的 3 段直线构成。

正应力幅疲劳强度曲线(见图 5)方程为:

$$\Delta\sigma_R^m N_R = \Delta\sigma_C^m \times 2 \times 10^6 \quad (N_R \leq 5 \times 10^6, m=3) \quad (1)$$

$$\Delta\sigma_R^m N_R = \Delta\sigma_D^m \times 2 \times 10^6 \quad (5 \times 10^6 < N_R \leq 10^8, m=5) \quad (2)$$

$$\Delta\sigma_R = \Delta\sigma_L = \left(\frac{5}{100}\right)^{0.2} \Delta\sigma_D = 0.549 \Delta\sigma_D \quad (N_R > 10^8) \quad (3)$$

$$\Delta\sigma_D = \left(\frac{2}{5}\right)^{0.2} \Delta\sigma_C = 0.737 \Delta\sigma_C \quad (4)$$

式中: N_R 为应力循环次数; $\Delta\sigma_R^m$ 为对应 m 值的正应力疲劳强度; $\Delta\sigma_C^m$ 为对应 m 值的正应力疲劳细节类别; $\Delta\sigma_D^m$ 为对应 m 值的正应力幅; $\Delta\sigma_R$ 为 $N_R > 10^8$ 时的正应力疲劳强度; $\Delta\sigma_L$ 为 $N_R > 10^8$ 时的正应力疲劳截止限; $\Delta\sigma_D$ 为正应力幅疲劳极限; $\Delta\sigma_C$ 为正应力疲劳细

节类别。

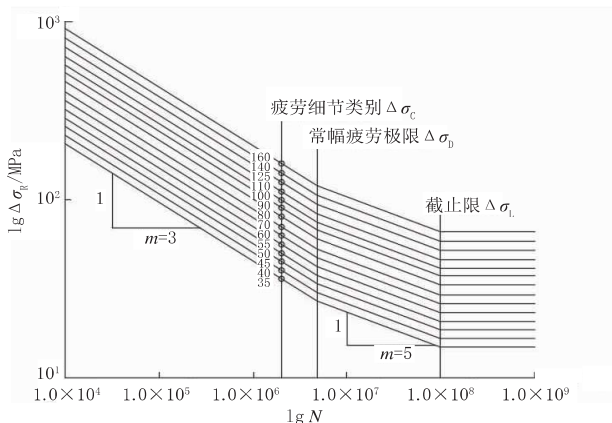


图5 正应力幅疲劳强度曲线

剪应力幅疲劳强度曲线(见图6)方程为:

$$\Delta\tau_R^m N_R = \Delta\tau_C^m \times 2 \times 10^6 \quad (N_R \leq 10^8, m=5) \quad (5)$$

$$\Delta\tau_R = \Delta\tau_L = \left(\frac{2}{100}\right)^{0.2} \Delta\tau_C = 0.457 \Delta\tau_C \quad (N_R > 10^8) \quad (6)$$

式中: $\Delta\tau_R^m$ 为 m 值对应的剪应力疲劳强度; $\Delta\tau_C^m$ 为 m 值对应的剪应力疲劳细节类别; $\Delta\tau_R$ 为 $N_R > 10^8$ 时的剪应力常幅疲劳极限; $\Delta\tau_L$ 为 $N_R > 10^8$ 时的剪应力幅疲劳截止限; $\Delta\tau_C$ 为剪应力疲劳细节类别。

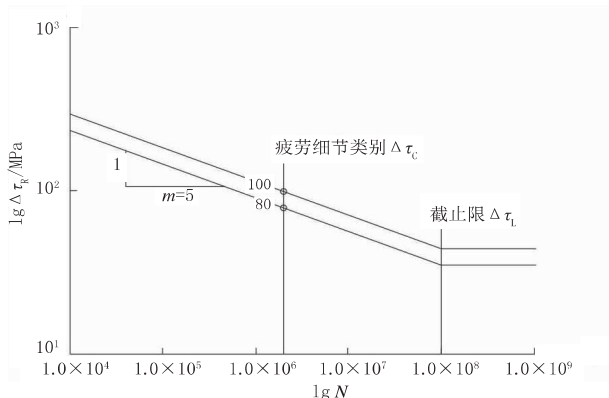


图6 剪应力幅疲劳强度曲线

3.3.2 计算结果

选取主梁最不利截面计算,即主墩支点处、梁跨跨中和跨间横隔板中间段。计算公式如下:

$$\gamma_{FF} \Delta\sigma_p \leq \frac{k_s \Delta\sigma_D}{\gamma_{Mf}} \quad (7)$$

$$\gamma_{FF} \Delta\tau_p \leq \frac{\Delta\tau_L}{\gamma_{Mf}} \quad (8)$$

$$\Delta\sigma_p = (1 + \Delta\varphi)(\sigma_{Pmax} - \sigma_{Pmin}) \quad (9)$$

$$\Delta\tau_p = (1 + \Delta\varphi)(\tau_{Pmax} - \tau_{Pmin}) \quad (10)$$

式中: γ_{FF} 为荷载分项系数; γ_{Mf} 为疲劳抗力分项系数; k_s 为尺寸效应折减系数; $\Delta\sigma_p$ 、 $\Delta\tau_p$ 为计算所得的正应力幅与剪应力幅; $\Delta\varphi$ 为放大系数; $\Delta\sigma_D$ 为正应力常幅疲劳极限; $\Delta\tau_L$ 为剪应力幅疲劳截止限; σ_{Pmax} 、 σ_{Pmin} 为计算所得的最大和最小正应力; τ_{Pmax} 、 τ_{Pmin} 为计算所

得的最大和最小剪应力。

疲劳细节类别为 90, $\gamma_{FF}=1$, $\gamma_{Mf}=1.35$, $\Delta\varphi=0$, $k_s=1$ 。由式(4)得 $\Delta\sigma_D=66.3$ MPa; 由式(6)得 $\Delta\tau_L=41.1$ MPa; 由式(7)得名义容许正应力幅为 49.1 MPa; 由式(8)得名义容许剪应力幅为 30.5 MPa。

有限元程序计算表明, 分离式模型顶板纵向焊缝处的应力值最大, 主要发生在跨中截面(见图7); 横梁式模型顶板应力分布较均匀。计算结果见表2~表6(表中 SXX 为横桥向正应力, SYY 为纵桥向剪应力)。



图7 分离式模型顶板应力云图(X向, 仅示意单跨)

表2 分离式模型主墩支点处顶板应力幅

工况编号	顶板纵缝1处 /MPa		顶板纵缝2处 /MPa	
	SXX	SYY	SXX	SYY
1	5.03	44.39	4.38	39.72
2	5.52	51.28	4.93	40.59
3	5.20	56.00	4.43	45.29
4	5.77	56.89	4.96	51.20
5	4.72	49.15	3.88	44.41
6	5.28	50.00	4.41	50.33
7	5.60	45.25	4.91	45.63
应力幅	1.05	12.50	1.08	11.48

表3 分离式模型跨中顶板应力幅

工况编号	顶板纵缝1处 /MPa		顶板纵缝2处 /MPa	
	SXX	SYY	SXX	SYY
1	84.20	8.14	-84.46	-42.10
2	104.20	11.84	-82.87	-42.21
3	126.60	17.01	-105.70	-50.67
4	124.70	15.86	-126.30	-59.07
5	106.60	13.31	-107.30	-50.55
6	104.70	12.16	-127.90	-58.96
7	82.27	6.99	-105.10	-50.50
应力幅	44.33	10.02	45.03	16.97

表4 横梁式模型主墩支点处顶板应力幅

工况编号	顶板纵缝1处 /MPa		顶板纵缝2处 /MPa	
	SXX	SYY	SXX	SYY
1	4.57	46.53	3.77	41.65
2	5.33	51.65	3.85	44.06
3	5.53	55.91	3.99	48.06
4	5.59	58.48	4.64	52.48
5	4.78	50.80	3.91	45.65
6	4.83	53.37	4.55	50.06
7	4.63	49.11	4.41	46.06
应力幅	1.01	11.95	0.87	10.83

表5 横梁式模型跨中顶板应力幅

工况编号	顶板纵缝1处/MPa		顶板纵缝2处/MPa	
	SXX	SYX	SXX	SYX
1	1.02	-15.54	0.89	-15.35
2	0.67	-16.13	1.03	-16.86
3	0.79	-17.04	0.75	-17.72
4	1.32	-18.44	1.08	-18.22
5	1.15	-16.44	0.61	-16.21
6	1.68	-17.85	0.94	-16.71
7	1.55	-16.94	1.22	-15.85
应力幅	1.01	2.90	0.61	2.87

表6 横梁式模型跨间横梁段(1/2跨处的横梁与1/4跨处的横梁之间的梁段)顶板应力幅

工况编号	顶板纵缝1处/MPa		顶板纵缝2处/MPa	
	SXX	SYX	SXX	SYX
1	16.48	-15.48	-17.88	-25.29
2	20.91	-16.29	-17.72	-26.45
3	25.07	-17.14	-22.05	-29.83
4	24.67	-18.47	-26.85	-33.31
5	20.64	-16.34	-22.21	-28.67
6	20.25	-17.66	-27.00	-32.15
7	16.09	-16.81	-22.67	-28.76
应力幅	8.98	2.99	9.28	8.02

计算表明,当梁跨间不设置横向贯通横隔板时,顶板最大正应力幅值 45.03 MPa,位于跨中截面;最大剪应力幅值 16.97 MPa,位于跨中截面。

当梁跨间设置 3 道横向贯通横隔板时,顶板最大正应力幅值 9.28 MPa,位于跨间横梁段截面;最大剪应力幅值 11.95 MPa,位于主墩支点处截面。

结合式(9)和式(10)计算所得的正应力幅值和剪应力幅值均小于名义容许应力,但跨间设置 3 道横隔板时,安全度明显优于不设置横隔板。项目设计最终采取折中方案,在主梁跨中位置设置 1 道横向贯通横隔板。

4 结 语

(1)全封闭式钢箱梁,不设置跨间横向贯通横隔板,能基本满足顶板疲劳验算要求,有效减少梁体表面与室外空气接触面积,达到防腐蚀和减少施工作业工序的目的。

(2)横隔板设置数量,对顶板疲劳应力幅计算结果影响明显。实际工程中,多片钢梁间纵向焊缝处的顶板疲劳验算,可作为调节横向贯通横隔板设置数量的有效依据。

参考文献:

- [1] GB 50017—2017, 钢结构设计标准[S].
- [2] JTG D60—2015, 公路桥涵设计通用规范[S].
- [3] JTG D64—2015, 公路钢结构桥梁设计规范[S].

《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