

某大桥单箱多室钢箱梁空间计算分析

吴 广

(武汉市汉阳市政建设集团有限公司,湖北 武汉 430050)

摘要:为避免钢桥验算中忽略桥面系的计算导致在极端情况可能发生失稳、疲劳破坏的问题,文章对钢桥空间设计理论进行介绍,提出钢桥桥面系需进行强度与抗疲劳验算的观点;以连续钢箱梁桥为例,判断了加劲肋刚度柔性,计算了剪力滞折减系数与不稳定折减系数,得到第一体系与第二体系叠加应力,并依据叠加原理进行验算;建立了疲劳Ⅰ、Ⅲ模型,完成了钢箱梁桥抗疲劳验算,根据规范进行了腹板与支撑加劲肋的验算。计算结果表明:箱梁在受压区桥面板宜采用闭口加劲肋;不能忽略钢桥分析理论得到的第二体系最大压应力;运营中应注意车辆限载。本文分析过程可为同类型钢箱梁设计提供指导。

关键词:钢箱梁;结构验算;第二体系;有效宽度;抗疲劳

中图分类号:U445.4

文献标识码:A

文章编号:1673-8993(2024)06-0049-08

doi:10.13402/j.gcjs.2024.06.077

Spatial calculation and analysis of steel box girder with single box for a bridge

WU Guang

(Wuhan Hanyang Municipal Construction Group Co., Ltd., Wuhan 430050, Hubei, China)

Abstract: In order to avoid the problems of instability and fatigue failure which may occur in extreme cases due to ignoring the calculation of deck system in the checking calculation of steel bridge, firstly, the space design theory of steel bridge is introduced, and the point of view that the strength and fatigue checking calculation of deck system of steel bridge is proposed. Then, taking continuous steel box girder bridge as an example, the stiffness flexibility of stiffeners is judged, the shear lag reduction coefficient and instability reduction coefficient are calculated, and the superimposed stress of the first system and the second system is obtained, and the calculation is carried out according to the superimposed principle. Thirdly, the fatigue models I and III are established, and the anti-fatigue calculation of steel box girder bridge is completed. Finally, the web and support stiffeners are checked according to the specification. The results show that closed stiffeners should be used in the bridge panel of the box girder in the compression zone. The maximum compressive stress of the second system obtained from the analysis theory of steel bridge cannot be ignored. Attention should be paid to vehicle load limit in operation; The calculation and analysis process is instructive to the design of the same type steel box girder.

Key words: steel box girder; structural checking calculation; second system; effective width; anti-fatigue

钢箱梁是大跨度桥梁的常用结构形式,其跨度可以达到上百米,但发生破坏造成的后果也十分严重,因此国内外学者持续对钢箱梁各个领域

进行研究。刘汉勇等^[1]分析了钢桥裂缝原因并给出了修复方法;范晨等^[2]用 matlab、ansys 软件分析钢桥的疲劳问题,并认为车桥耦合动力分析方

收稿日期:2023-12-12

作者简介:吴 广(1982—),男,高级工程师,从事桥梁结构设计与研究。

法精度更高;庄庆泰等^[3]采用梁格理论进行钢箱梁桥抗倾覆问题的研究;欧阳洋等^[4]对腹板桥面板细部构造进行疲劳分析;李盘山等^[5]根据混合单元模型理论,对钢箱梁剪力滞效应进行分析。

现有的研究大多是只是针对钢箱梁某一局部构造设计或破坏形式进行研究,这些研究鲜能对一线桥梁设计师有指导意义,设计师迫切需要系统的钢箱梁计算方法来指导工作;另外,设计师往往仅使用单梁理论验算,忽略桥面体系计算,这可能产生桥梁破坏隐患。基于此,本文提出一套钢箱梁验算方法,对一单箱多室钢箱梁进行空间计算,以期可为类似钢箱梁设计提供参考。

1 钢桥空间设计理论

1.1 钢桥三体系计算理论

钢桥面板为正交异性板^[6,7],某一位置应力可以视为 3 个基本结构体系的应力组合。第一体系为主梁体系,由主梁及其共同受弯的盖板、纵向加劲肋组成;第二体系为桥面体系,包括纵、横肋与盖板,将荷载传递到横隔板与腹板。第三体系为盖板体系,由纵、横肋上各向同性的盖板构成,通常可以忽略第三体系对结构产生的影响。

正交异性板计算的主要方法^[8]:1)整体分析法。利用有限元软件,同时考虑第一体系与第二体系的板壳模型,计算精准,但效率低;2)叠加分析法。分别建立第一体系与第二体系模型,第一体系通过杆系模型计算,第二体系通过 P-E 法、格子梁法、比拟正交异性板法等方式计算,叠加分析法效率、精度较高,可以适用于指导设计师进行钢箱梁设计。

1.2 钢桥抗疲劳设计理论

《公路钢结构桥梁设计规范》(JTGD 64—2015)^[9]中,采用容许应力法对钢构件进行疲劳设计^[10]。根据活载加载位置与大小不同,提出了 3 种疲劳设计模型,疲劳 I 模型采用车道荷载,表示构件不会发生疲劳破坏;疲劳 II、III 模型加载时需要考虑车轮尺寸加载,疲劳 II 模型表示构件百年内不会发生疲劳破坏,疲劳 III 模型表示桥面体系不会发生疲劳破坏。

2 工程概况

某沿江大桥第六联为双跨等高连续钢箱梁,布跨为 2×30 m,桥梁宽度为 13.5 m,标准桥面布置 0.5 m(防撞护栏) + 7.5 m(车行道) + 5 m(人行道) + 0.5 m(防撞护栏) = 13.5 m。主梁横断面为单箱三室形式,其标准断面如图 1 所示,梁高 1.4 m;悬臂长度为 0.744 m,底板宽度为 11.368 m;跨中顶板厚度为 16 mm,中支点顶部 4.2 m、底部 3.4 m 范围内加厚至 20 mm;腹板沿顺桥厚度均为 16 mm;顶板设置闭口加劲肋,高度为 280 mm,底板设置开口加劲肋,高度为 180 mm,板厚度均为 16 mm。钢箱梁桥面铺装自上而下采用 4 cm 厚 SMA-13SBS 改性沥青玛蹄脂碎石混凝土(掺 0.3% 聚酯纤维) + 黏层油(PC-3 型乳化沥青) + 6 cm 厚 AC-20 中粒式 SBS 改性沥青混凝土 + 粘层油(PC-3 型乳化沥青) + 聚合物改性沥青 PB(I)防水层 + 水性渗透型无机防水剂 + 8 cm 厚 C50 钢纤维混凝土。为加强桥面铺装与钢箱梁的联系,在钢箱梁顶面设置 M19(长度为 60 mm)剪力钉,剪力钉采用圆柱头焊钉,材质采用 ML15AL。

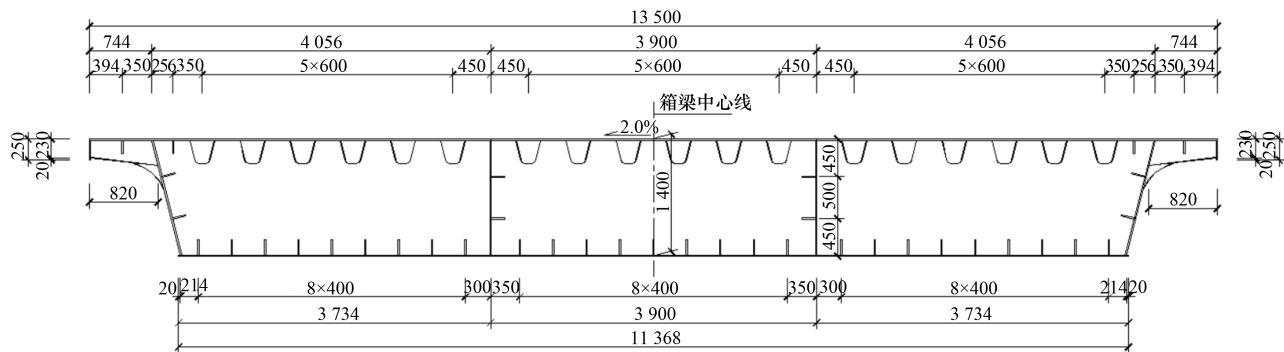


图 1 主梁结构

mm

3 主梁计算模型

采用 midascivil 2021 建模,模型共 44 个单元,57 个节点;采用弹性连接模拟支座,考虑到焊缝、横隔板等结构未在建模重量,恒载系数取 1.2;二期铺装 90 kN/m;活载采用城 A 级双向两车道及人行荷载按 5 kPa 计算;温度荷载根据《公路桥涵设计通用规范》(JTGD 60—2015)^[11]设置。

4 桥梁验算结果

4.1 纵向计算与分析

4.1.1 内力计算

两跨连续梁受力特点:1) 支点存在负弯矩;2) 跨中存在剪力,计算结果如图 2.3 所示,最大负弯矩为 29 487 kN·m,最大正弯矩为 29 523 kN·m,最大剪力为 5 565 kN。

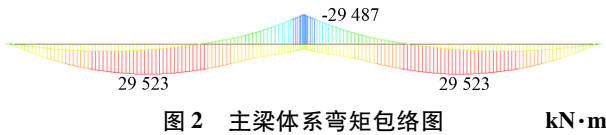


图2 主梁体系弯矩包络图 kN·m

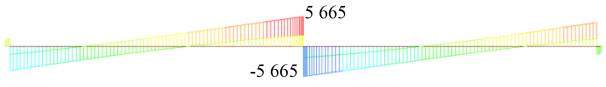


图3 主梁体系剪力包络图 kN

4.1.2 刚度计算

活载下最大竖向位移需要满足式(1):

$$D \leq \frac{L}{500} \quad (1)$$

式中: D 为不计入冲击系数活载下的位移, mm; L 为计算跨径, m。

$$D = 17.7 \text{ mm} < \frac{L}{500} = \frac{29\,420}{500} = 58.8 \text{ mm}, \text{ 满足}$$

要求。

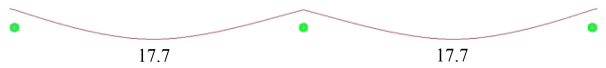


图4 主梁体系位移 mm

4.1.3 加劲肋刚柔性分析

当纵向加劲肋满足式(2)~(4),加劲肋为刚性加劲肋,否则为柔性加劲肋;表2为顶板加劲肋与底板加劲肋刚性判断表。

$$\gamma_l \geq \gamma_l^* \quad (2)$$

$$A_{s,l} \geq \frac{bt}{10n} \quad (3)$$

$$\gamma_l^* = \frac{1}{n} [4n^2(1+n\delta_l)\alpha^2 - (\alpha^2+1)^2] (\alpha \leq \alpha_0)$$

$$\gamma_l^* = \frac{1}{n} \{ [2n^2(1+n\delta_l) - 1]^2 - 1 \} (\alpha > \alpha_0) \quad (4)$$

式中: $\alpha_0 = \sqrt[4]{1+n\gamma_l}$, $n = n_l + 1$, $\delta_l = \frac{A_{s,l}}{bt}$; γ_l 为纵肋相对刚度; α 为加劲板长宽比; $A_{s,l}$ 为单根纵肋截面积, mm²; b 为腹板间距, mm; t 为母版厚度, mm; n 为纵肋个数。

由表1可知:1) 本钢箱梁顶底板加劲肋均为刚性加劲肋,满足工程基本要求;2) 闭口加劲肋的 $A_{s,l}$ 和 γ_l 的系数分别为 6.1 和 21.6,明显大于开口加劲肋的系数 4.8 和 2.3,说明本工程中,位于顶板闭口加劲肋的刚性大于位于底板开口加劲肋,这也避免受压的顶板发生失稳破坏。

表1 加劲肋刚性判断

位置	纵肋面积/mm ²	相对刚度
闭口加劲肋	计算值	5 629
	验算值	927.1
	系数	6
	判断	满足
开口加劲肋	计算值	2 880
	验算值	597.4
	系数	5
	判断	满足

4.1.4 剪力滞分析

箱型截面有效宽度按照式(5)和(6)计算,有效宽度及折减系数结果如表3~4所示。

$$\left\{ \begin{array}{l} (b_{e,i}^s = b_i \frac{b_i}{l_0} \leq 0.02 \\ b_{e,i}^s = [1.06 - 3.2 \frac{b_i}{l_0} + 4.5 (\frac{b_i}{l_0})^2] \\ b_i 0.02 < \frac{b_i}{l_0} < 0.30 \\ b_{e,i}^s = 0.15 l_0 \frac{b_i}{l_0} \geq 0.30 \end{array} \right. \quad (5)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} b_{e,i}^s = b_i \frac{b_i}{l_0} \leq 0.05 \\ b_{e,i}^s = (1.1 - 2 \frac{b_i}{l_0}) b_i \quad 0.05 < \frac{b_i}{l_0} < 0.30 \\ b_{e,i}^s = 0.15 l_0 \frac{b_i}{l_0} \geq 0.30 \end{array} \right. \quad (6)$$

式中: $b_{e,i}^*$ 为有效宽度, m; b_i 为伸臂长度或腹板间距的一半, m; l_0 为等效跨径, m, 边支点与跨中处为 $l_0 = 0.8L_0$, 中支点 $l_0 = 0.2L_0$, $L_0 = 30$ m。

由表 4 可知: 1) 与跨中相比, 中支点处的有效宽度折减程度更大, 说明剪力滞效应对中支点处影响更大; 2) 与悬臂相比, 腹板处有效宽度折减程度更大。

4.1.5 局部稳定分析

钢箱梁顶、底会处于受压状态, 需要考虑局部稳定的折减, 局部稳定系数计算见式 (7) ~ (8), 计算结果如表 4 所示。

$$\rho = \frac{1}{2} \left\{ 1 + \frac{1}{\lambda_p^2} (1 + \varepsilon_0) - \sqrt{\left[1 + \frac{1}{\lambda_p^2} (1 + \varepsilon_0) \right]^2 - \frac{4}{\lambda_p^2}} \right\} \quad (7)$$

$$\lambda_p = 1.05 \frac{b_p}{t} \sqrt{\frac{f_y}{E} \left(\frac{1}{k} \right)} \quad (8)$$

式中: $\varepsilon_0 = 0.8(\lambda_p - 0.4)$; λ_p 为相对宽厚比; ρ

为局部稳定折减系数; b_p 为纵肋间距, m; t 为母版厚度, m; f_y 为钢板屈服强度, MPa; E 为钢材弹性模量, MPa; k 为弹性屈曲系数, 刚性加劲肋, $k = 4$ 。

由表 5 可知, 相对宽厚比 λ_p 越大, 局部稳定折减程度越高; 进一步分析可知, 对于结构尺寸设计, 其他条件一定, 纵肋间距越大、母版厚度越小其折减程度越大, 结构受力越不利。

4.1.6 顶底板第一体系关键位置正应力计算

表 6 所示为综合折减系数, 图 5 ~ 6 为综合折减系数下的主梁综合折减有效宽度截面图, 根据式 (9) 计算第一体系主梁正应力, 主梁正应力计算结果如表 6 所示。

$$\sigma_1 = \frac{M}{I} y \quad (9)$$

式中: M 为最不利弯矩, kN·m; I 为折减后截面对应惯性矩, m⁴; y 为折减后截面对应形心高度, m。

表 2 有效宽度计算

位置	等效跨径	顶板有效宽度	悬臂有效宽度		底板有效宽度	
		$b_{e,2}^*$	$b_{e,1}^*$	$b_{e,3}^*$	$a_{e,1}^*$	$a_{e,1}^*$
中支点	12	0.900	0.545	0.900	0.907	0.900
边支点与跨中	24	1.666	0.718	1.618	1.619	1.828

表 3 有效宽度折减系数

位置	悬臂折减系数	腹板间折减系数			
	顶板	顶板 1	顶板 2	底板	底板
中支点	0.732	0.444	0.462	0.538	0.462
边支点与跨中	0.965	0.822	0.830	0.959	0.938

表 4 局部稳定折减系数计算结果

位置	计算宽度/mm	相对宽厚比	单个处有效宽度	局部稳定折减系数
顶板(悬臂处)	366	0.491	334.6	0.914
顶板(箱室内)	300	0.403	299.2	0.997
底板	400	0.537	348.9	0.872

表 5 综合折减系数计算

	位置	剪力滞折减系数	局部稳定折减系数	综合折减系数
跨中	底板	—	0.938	1.000
	顶板	腹板间	0.822	0.997
		悬臂	0.965	0.914
中支点	顶板	腹板间	0.444	1.000
		悬臂	0.732	1.000
	底板	—	0.462	0.872



图 5 综合折减跨中有效宽度截面



图 6 综合折减中支点有效宽度截面

表 6 主梁正应力计算结果

位置		基本组合弯矩 数值/(kN·m)	折减后的 惯性矩/mm ⁴	上下缘距离 中性轴/mm	主梁应力/MPa
中支点负弯矩	上缘	-29 487	1.22×10^{11}	635	154.0
	下缘	-29 487	1.22×10^{11}	765	-185.6
跨中正弯矩	上缘	29 523	2.29×10^{11}	684	-88.1
	下缘	29 523	2.29×10^{11}	716	92.2

4.1.7 剪应力计算

主梁中支点剪应力计算值为 66.7 MPa，跨中剪应力计算值为 26.4 MPa，小于允许的 160 MPa。

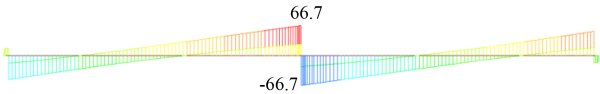


图 7 主梁剪应力包络图 MPa

4.2 顶板体系计算

4.2.1 第二体系简化

箱梁顶板第二体系是由面板和纵肋组成的正交异性板，该体系支撑在横隔板上，承受自重和桥面板上的外力，包括铺装、车轮荷载等。

图 8 为闭口加劲肋尺寸，模板厚度为 16 mm，腹板厚度为 8 mm，底板厚度为 8 mm；根据式 (10) 将闭口加劲肋简化为工字型截面，简化后截面如图 9 所示。

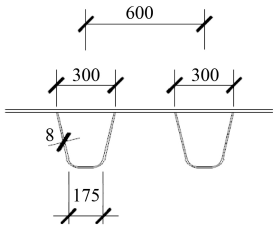


图 8 闭口加劲肋尺寸示意 mm

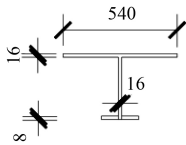


图 9 闭口加劲肋简化图 mm

$$\lambda = (1.1 - 2 \frac{c}{d_0} b_i) \tag{10}$$

式中： λ 为单侧有效宽度，m； c 为加劲肋间距的一半，m，取 150 mm； d_0 为横隔板间距，m，取 1 500 mm。

4.2.2 第二体系模型建立

第二体系 midas civil 模型如图 10 所示，建模步骤如下。

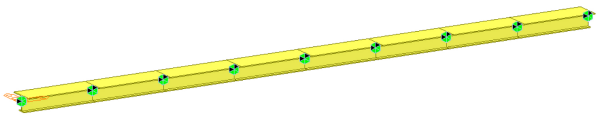


图 10 第二体系模型

(1) 建立单元。采用单梁法计算，单元截面如图所示；横隔板间距为纵肋的跨度，取 8 跨计算。

(2) 设置边界。对横隔板位置添加弹性支撑，设置如表 7 所示。

(3) 添加荷载。考虑到焊缝重量，恒载系数取 1.05；二期铺装取 2.8 kN/m；活载采用车辆荷载，车辆荷载技术指标如表 8 所示，由于加劲肋宽度小于轮宽，重力标准值需要进行折减。

$$\beta = 0.5 \times \mu \times \frac{a_2}{z + 2 \times e} \tag{11}$$

式中： β 为折减系数； μ 为冲击系数，取 1.3； a_2 为纵肋间距取 0.6； z 为后轮着地宽度，取 0.6； e 为铺装厚度，取 0.2，计算得 $\beta = 0.4$ 。

表 7 第二体系边界设置

节点号	纵向平动	横向平动	竖向平动	纵向转动	横向转动	竖向转动
1	1	1	1	1	0	1
2、3、4、5、6、7、8、9	0	1	1	1	0	1

表 8 车辆荷载技术

项目	技术指标	项目	技术指标
车国内重力标准值/kN	550	轮距/m	1.8
前轴重力标准值/kN	30	前轮着地宽度及长度/m	0.3×0.2
中轴重力标准值/kN	2×120	中、后轮着地宽度及长度/m	0.6×0.2
后轴重力标准值/kN	2×140	车辆外形尺寸/m	15×2.5
轴距/m	3+1.4+7+1.4	—	—

4.2.3 顶板体系计算结果

计算后，第二体系最大拉应力为 22.3 MPa，最大压应力 32.9 MPa。

4.3 总应力计算

4.3.1 第一、二体系应力组合应力

钢箱梁相应位置的第一、第二体系应力相加结果如表 9 所示，计算应力数值小于容许数值。

4.3.2 腹板正应力验算

腹板承受正应力 σ_x 与剪应力 τ ，需要满足式 (12) 要求，计算结果如表 10 所示。

$$\gamma_0 \sqrt{\left(\frac{\sigma_x}{f_d}\right)^2 + \left(\frac{\tau}{f_{vd}}\right)^2} \leq 1 \tag{12}$$

式中： $\tau = \frac{VS}{It}$ ，MPa； V 为最不利剪力，kN； S 为有效截面距形心的净距，m； t 为腹板厚度，m； f_d 、 f_{vd} 为钢材抗拉、抗剪强度设计值，MPa。

4.4 抗疲劳验算

4.4.1 疲劳荷载计算模型 I

此桥为车行钢箱梁，需要进行抗疲劳验算，建立 midas 疲劳 I 模型，采用车道荷载，车道荷载技术指集中荷载取 $0.7 P_k$ ，均布荷载取 $0.3 q_k$ 。

其中： P_k 为集中荷载标准值，kN； q_k 为均布荷载标准值，kN/m。

疲劳 I 模型计算结果需要满足式 (13) ~ (14)

要求：

$$\gamma_{FF} \Delta\sigma_p \leq \frac{k_s \Delta\sigma_D}{\gamma_{Mf}} \tag{13}$$

$$\gamma_{FF} \Delta\tau_p \leq \frac{\Delta\tau_L}{\gamma_{Mf}} \tag{14}$$

式中： γ_{FF} 为荷载系数， $\gamma_{FF} = 1$ ； γ_{Mf} 为抗力系数， $\gamma_{Mf} = 1.35$ ； k_s 为尺寸折减系数， $k_s = 1$ ； $\Delta\sigma_p$ 、 $\Delta\tau_p$ 分别为疲劳 I 模型的正应力幅、剪应力幅； $\Delta\sigma_D$ 、 $\Delta\tau_L$ 分别为正应力常幅疲劳极限和剪应力幅疲劳截止限，疲劳细节类别分别取 110 MPa 和 100 MPa。

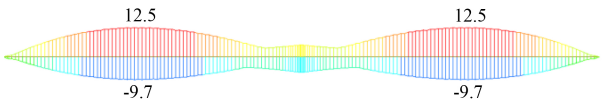


图 11 疲劳 I 模型正应力包络图 MPa

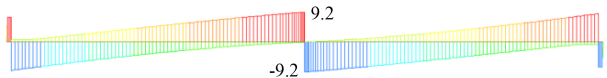


图 12 疲劳 I 模型剪应力包络图 MPa

最大疲劳正应力幅为 $12.5 - (-9.7) = 22.2$ MPa，最大疲劳剪应力幅为 $9.2 - (-9.2) =$

18.4 MPa，其中， $\gamma_{FF} \Delta\sigma_p = 22.2 \leq \frac{k_s \Delta\sigma_D}{\gamma_{Mf}} = 60.1$ ，

$\gamma_{FF} \Delta\tau_p = 18.4 \leq \frac{\Delta\tau_L}{\gamma_{Mf}} = 33.9$ ，疲劳 I 模型计算满足

要求。

表 9 第一、二体系应力组合应力 MPa

荷载工况		基本组合应力		容许应力
桥面板	第一体系纵梁上缘	最大拉应力	154.0	—
		最大压应力	88.1	—
	第二体系 U 肋上缘	最大拉应力	22.3	—
		最大压应力	32.9	—
	桥面板第一、第二体系组合	最大拉应力	176.3	270
		最大压应力	121.0	270
底板	第一体系纵梁下缘	最大拉应力	92.2	270
		最大压应力	185.6	270

表 10 腹板正应力验算

变量	数值	单位
结构重要性系数	1.1	—
正应力	168.7	MPa
抗弯强度设计值	275	MPa
剪应力	42.3	MPa
抗剪强度设计值	160	MPa
验算值	0.735	满足要求

4.4.2 疲劳荷载计算模型Ⅲ

采用 midascivil 2021 建立三维板单元疲劳Ⅲ模型，如图 13 所示，模型由两相邻横隔板间顶板及其加劲肋组成，为提高计算效率，从桥梁对称中线断开取半结构计算；模型共3 588个单元，2 960个节点；边界采用固定支承，设置于横隔板、腹板、对称结构断开处的顶板节点；荷载采用单车模型，其荷载参数如图 14 所示。

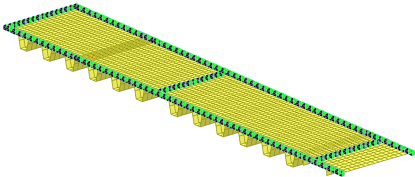


图 13 三维板单元疲劳Ⅲ模型

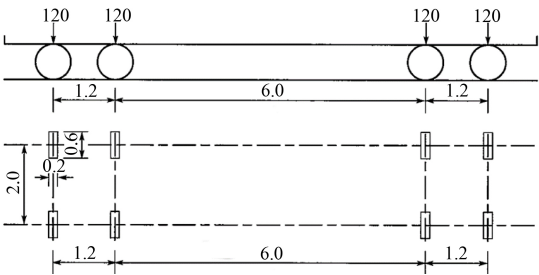


图 14 疲劳Ⅲ模型车辆荷载

采用疲劳Ⅲ模型计算时，需要满足式(15)~(17)要求：

$$\gamma_{\text{FI}} \Delta \sigma_{\text{E2}} \leq \frac{k_s \Delta \sigma_c}{\gamma_{\text{Mf}}} \quad (15)$$

$$\gamma_{\text{FI}} \Delta \tau_{\text{E2}} \leq \frac{\Delta \tau_c}{\gamma_{\text{Mf}}} \quad (16)$$

$$\left(\frac{\gamma_{\text{FI}} \Delta \sigma_{\text{E2}}}{k_s \Delta \sigma_c / \gamma_{\text{Mf}}} \right)^3 + \left(\frac{\gamma_{\text{FI}} \Delta \tau_{\text{E2}}}{\Delta \tau_c / \gamma_{\text{Mf}}} \right)^5 \leq 1 \quad (17)$$

式中： $\Delta \sigma_{\text{E2}}$ 、 $\Delta \tau_{\text{E2}}$ 为 200 万次疲劳荷载下等效常

正应力幅、剪应力幅； $\Delta \sigma_c$ 、 $\Delta \tau_c$ 为 200 万次疲劳荷载下正应力、剪应力疲劳强度。

疲劳Ⅲ模型计算结果如图 15~16 所示，一个轮载范围内最大疲劳正应力幅 57.2、43.5、36.8 MPa，最大疲劳剪应力幅 40.7、27.0、20.8 MPa，其中，

$$\gamma_{\text{FI}} \Delta \sigma_{\text{E2}} = 50.7 \leq \frac{k_s \Delta \sigma_c}{\gamma_{\text{Mf}}} = 81.5; \gamma_{\text{FI}} \Delta \tau_{\text{E2}} = 34.8 \leq$$

$$\frac{\Delta \tau_c}{\gamma_{\text{Mf}}} = 74.1; \left(\frac{\gamma_{\text{FI}} \Delta \sigma_{\text{E2}}}{k_s \Delta \sigma_c / \gamma_{\text{Mf}}} \right)^3 + \left(\frac{\gamma_{\text{FI}} \Delta \tau_{\text{E2}}}{\Delta \tau_c / \gamma_{\text{Mf}}} \right)^5 = 0.26 \leq 1,$$

疲劳Ⅲ模型计算满足要求。

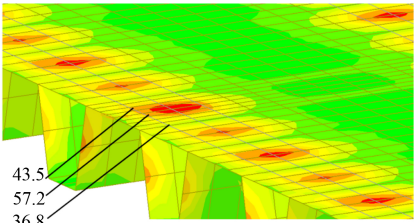


图 15 疲劳Ⅲ模型正应力

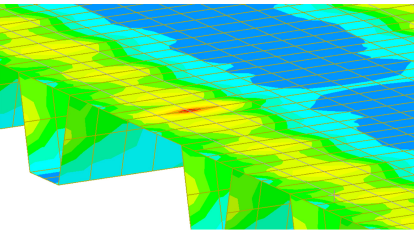


图 16 疲劳Ⅲ模型剪应力

5 钢箱梁腹板计算

5.1 腹板厚度计算

本钢箱梁设有横隔板、纵向加劲肋，腹板最小厚度需要满足式(18)，计算最小厚度为 5 mm，小于腹板厚度 16 mm，满足要求。

$$T \geq \frac{\eta H}{240} \quad (18)$$

式中： $\eta = \sqrt{\frac{\tau}{f_s d}}$ ，但不小于 0.85，取 0.85； H 为腹板高度； T 为腹板厚度。

5.2 腹板间距计算

对于腹板间距需满足式(19)的要求，计算结果如表 11 所示。

表 11 腹板间距计算结果

部位	横向加劲肋间距/mm	腹板计算高度/mm	腹板厚度/mm	正应力/MPa	剪应力/MPa	左式	是否满足要求
支点	1 500	1 400	16	185.6	66.7	0.11	是
跨中	1 500	1 400	16	176.3	26.4	0.04	是

$$\left\{ \begin{array}{l} \left(\frac{H}{100T} \right)^4 \left[\left(\frac{\sigma}{900} \right)^2 + \left(\frac{\tau}{120 + 58(H/\sigma)^2} \right)^2 \right] \leq 1 \\ \left(\frac{a}{H} \right) > 0.8 \\ \left(\frac{H}{100T} \right)^4 \left[\left(\frac{\sigma}{900} \right)^2 + \left(\frac{\tau}{90 + 77(H/\sigma)^2} \right)^2 \right] \leq 1 \\ \left(\frac{a}{H} \right) \leq 0.8 \end{array} \right. \quad (19)$$

5.3 支承处应力计算

以中支承为例, 验算支承处应力值, 验算需要满足式(20) - (22)。

$$\gamma_0 \frac{R_v}{A_s + B_{eb}} \leq f_{cd} \quad (20)$$

$$\gamma_0 \frac{2R_v}{A_s + TB_{eb}} \leq f_d \quad (21)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} B_{ev} = (n_s - 1) b_s + 24Tb_s < 24T \\ B_{ev} = 24n_s Tb_s \geq 24T \end{array} \right. \quad (22)$$

式中: R_v 为基本组合下反力, 取 8 076 kN; A_s 为支承加劲肋面积和; B_{eb} 为局部承压计算宽度; f_{cd} 为钢材端面承压强度值, 取 355 MPa; b_s 为支撑加劲肋间距, 取 500 mm。

经计算式(19)左侧为 121 MPa, 小于 355 MPa; 式(20)左侧为 190 MPa, 小于 270 MPa, 满足要求。

6 结 论

本文主要引入了钢桥分析理论, 基于此理论验算双跨等高连续钢箱梁, 提出钢桥桥面系需进行强度与抗疲劳验算等验算指标。判断加劲肋刚度, 并计算了剪力滞折减系数与不稳定折减系数。得到第一体系与第二体系叠加应力, 并依据叠加原理进行验算。尤其要重视顶板宜设置刚性更大的闭口加劲肋, 不宜设置开口加劲肋; 且不能忽略钢桥分析理论得到的第二体系最大压应力; 同时汽车荷载为疲劳模型中唯一外荷载, 对疲劳计算影响较大, 建立了疲劳 I、III 模型, 完

成了钢箱梁桥抗疲劳验算对钢箱梁顶板受压同时剪力滞效应对中支点影响较大, 设计时应在中支点处增加补强措施, 增加主梁刚度; 上述计算方法可为市政公路钢箱梁设计提供有力的技术支撑及安全质量保证。

参考文献:

- [1] 刘汉勇, 代希华, 程寿山. 大跨径钢箱梁桥正交异性板疲劳裂纹发展规律及处置措施[J]. 公路交通科技, 2022, 39(8): 32 - 38.
- [2] 范晨, 王莹, 李兆霞. 以疲劳评估为目标的大跨钢箱梁桥车桥耦合动力分析方法[J]. 振动与冲击, 2020, 39(6): 236 - 242.
- [3] 庄庆泰, 车鑫. 基于梁格理论连续钢箱梁桥抗倾覆性能研究[J]. 公路交通科技: 应用技术版, 2019(4): 79 - 82.
- [4] 欧阳洋, 祝志文, 李健朋. 钢箱梁面板 - 纵向腹板构造细节轮载应力的参数分析[J]. 公路交通科技, 2018, 35(12): 55 - 62.
- [5] 李盘山, 吕红, 许为民, 等. 带 UHPC 组合桥面板的连续组合钢箱梁桥剪力滞效应分析[J]. 公路交通科技, 2021(S1): 118 - 124.
- [6] 李天龙. 板桁结合桥梁正交异性板结构设计与力学行为分析[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2014.
- [7] 丁作常, 蒲果富. 钢箱梁第一体系计算分析[C]//中国公路学会桥梁和结构工程分会 2015 年全国桥梁学术会议. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2015.
- [8] 胡光伟, 钱振东, 黄卫. 正交异性钢箱梁桥面第二体系结构优化设计[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2001, 31(3): 76 - 78.
- [9] 公路钢结构桥梁设计规范: JTGD64—015[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2015.
- [10] 王兵见, 史耀中, 陈可. 公路钢箱梁疲劳安全分析方法研究[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2020(10): 226 - 229.
- [11] 公路桥涵设计通用规范: JTGD 60—015[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2015.