

引用本文:叶华文,段智超,王天琦,等.城轨钢箱梁 U 肋正交异性钢桥面板疲劳应力的正交化计算方法[J].建筑科学与工程学报,2020,37(6):100-107.

YE Hua-wen, DUAN Zhi-chao, WANG Tian-qi, et al. Orthogonalization Calculation of Fatigue Stress for U-rib Orthotropic Steel Deck of Rail Transit Box Girder[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2020, 37(6): 100-107.

DOI:10.19815/j.jace.2019.12050

# 城轨钢箱梁 U 肋正交异性钢桥面板疲劳应力的正交化计算方法

叶华文<sup>1</sup>, 段智超<sup>1</sup>, 王天琦<sup>1</sup>, 刘安双<sup>2</sup>, 漆 勇<sup>2</sup>

(1. 西南交通大学 土木工程学院, 四川 成都 610031; 2. 林同棧国际工程咨询(中国)有限公司, 重庆 401121)

**摘要:**针对城轨钢箱梁正交异性桥面板关键构造疲劳应力问题,基于有限元方法提出正交化计算方法。首先计算典型正交异性钢桥面板构造疲劳应力在城轨 A 型车和 B 型车作用下的纵向影响范围及最不利加载位置,并分析减振垫、吊点横隔板、轨下纵梁和道床板等参数的影响。然后根据大量工程实桥设计参数统计提出轨道交通桥梁正交异性板钢箱梁基准计算模型,并建立基准计算模型的空间有限元模型,通过数值计算得到顶板厚度、横隔板高度、横隔板间距、轨下纵梁高度及 2 种常见开孔形式等关键设计参数的影响系数,基于正交化方法提出不同设计参数条件下正交异性桥面板结构细节的疲劳应力计算公式。最后通过算例验证了正交化计算方法的可靠性和适用性。结果表明:城轨 A 型车在疲劳荷载作用下结构受力最不利;轨下纵梁刚度对疲劳应力有显著影响。

**关键词:**城市轨道交通桥梁;正交异性桥面板;U 肋;疲劳应力;正交化方法

**中图分类号:** TU391

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1673-2049(2020)06-0100-08

## Orthogonalization Calculation of Fatigue Stress for U-rib Orthotropic Steel Deck of Rail Transit Box Girder

YE Hua-wen<sup>1</sup>, DUAN Zhi-chao<sup>1</sup>, WANG Tian-qi<sup>1</sup>, LIU An-shuang<sup>2</sup>, QI Yong<sup>2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, Sichuan, China;

2. T. Y. Lin International Engineering Consulting Co., Ltd., Chongqing 401121, China)

**Abstract:** In order to obtain the fatigue stress of orthotropic steel deck of urban rail transit box girder, an orthogonalization method was proposed based on finite element analysis method. Firstly, the longitudinal and lateral influence scope and the most unfavorable loading position were obtained for the typical orthotropic steel deck under the urban rail loadings, and the influences of key parameters were analyzed, such as the stiffness of damping pad, suspended diaphragm and stringer as well as ballast bed. Then the benchmark of the U-rib orthotropic steel deck of rail transit box girder was also proposed according to numerous engineering data statistics, meanwhile the finite element model was also established, and the influence coefficient was calculated based on the parameters including deck plate thickness, diaphragm height, diaphragm spacing, stringer height and two cutout shapes. Finally, the reliability and applicability

收稿日期:2019-12-17

基金项目:四川省科技计划项目(2019YJ0223)

作者简介:叶华文(1982-),男,湖北红安人,副教授,工学博士, E-mail:hbha2000@163.com。

of the orthogonalization method was validated by several examples. The results show that the structural stress under fatigue load of urban rail A is the most unfavorable. The stiffness of stringer has a significant influence on the fatigue stress.

**Key words:** urban rail transit bridge; orthotropic steel deck; U-rib; fatigue stress; orthogonalization method

## 0 引言

正交异性钢桥面是由纵、横加劲肋与桥面板组成的共同承受车轮荷载的结构,其以自重轻、承载能力强和整体性好等优点在国内外大跨度公路和轨道交通桥梁中得到广泛应用。正交异性钢桥面板由于构造复杂、焊缝多、焊接残余应力等原因,在车轮荷载反复作用下容易出现疲劳破坏,成为影响桥梁结构正常使用和行车安全的重要因素。一般根据典型的正交异性钢桥面疲劳开裂区域将其分为以下关键疲劳细节:①纵肋与桥面板连接构造;②纵肋对接构造;③纵肋和横隔板连接构造;④横隔板开孔部位。目前国内外对正交异性桥面板的疲劳寿命评估研究主要有2种方法:①基于关键细节疲劳应力分析的名义应力法或热点应力法<sup>[1-3]</sup>;②疲劳试验验证<sup>[4-9]</sup>。相关设计规范<sup>[10-11]</sup>也针对公路和铁路桥梁正交异性钢桥面提供了相应的疲劳强度等级。

由于正交异性钢桥面结构在桥面车辆作用下呈现显著的局部变形特征,因此活载形式(公路和铁路)对其有明显影响。城市轨道交通桥梁在桥面构造、列车轴重及频率上与铁路及公路差异很大,《城市轨道交通桥梁设计规范》<sup>[12]</sup>的相关规定针对性不够,仍需根据不同桥梁设计。采用传统的有限元方法建立复杂的空间有限元模型进行疲劳应力分析过程繁琐,需要有相关经验的研究人员实施。因此,针对城市轨道交通桥梁钢箱梁正交异性钢桥面的构造和受力特征,有必要提出一种简便、可靠和实用的疲劳应力计算方法,以提高设计精度和效率。

城市轨道交通桥梁钢箱梁正交异性钢桥面构造在城轨列车作用下,处于线弹性小变形状态,各疲劳细节的关键影响参数的相互影响可以忽略不计,因此可采用在动力学、图像处理及计算机科学等领域广泛应用的正交化方法计算疲劳应力。根据该思路,吴臻旺<sup>[13]</sup>根据顶板厚度、主梁高度、横隔板间距及吊杆纵向间距4个参数对结构进行研究,提出了公路悬索桥正交异性桥面板的局部应力简化计算方法。

本文以城市轨道交通桥梁钢箱梁中典型正交异

性钢桥面及轨枕构造(重庆环线高家花园城市轨道交通钢箱梁)为研究对象,采用有限元方法计算典型正交异性钢桥面构造疲劳应力在城轨A、B型车作用下的纵向影响范围及最不利加载位置,并分析减振垫、吊点横隔板、轨下纵梁和道床板的影响。然后根据大量工程实桥设计参数(表1)<sup>[14-20]</sup>,提出轨道交通桥梁正交异性板钢箱梁基准计算模型和正交异性钢桥面关键细节疲劳应力的正交化计算方法,并验证其适用性和精确度。

## 1 正交异性钢桥面典型构造及受力

### 1.1 正交异性钢桥面典型构造

重庆轨道环线高家花园专用桥为双塔双索面斜拉桥,主跨部分采用扁平钢箱梁,如图1所示,横隔板间距和高度均为3 m,厚度12 mm;顶板厚度16 mm,腹板厚度30 mm,底板厚度12 mm;顶板U肋上口宽300 mm,下宽170 mm,高度300 mm,板厚8 mm;轨下纵梁高度800 mm,腹板厚度20 mm,翼缘板尺寸300 mm×20 mm;箱梁腹板板肋尺寸240 mm×20 mm;底板U肋上口宽400 mm,下宽250 mm,高度260 mm,板厚8 mm;橡胶减振垫厚度30 mm,道床板宽度2.3 m,厚度261 mm;短轨枕宽度450 mm,厚度170 mm。

### 1.2 列车荷载的影响范围

#### 1.2.1 列车荷载

《城市轨道交通桥梁设计规范》<sup>[12]</sup>中的列车荷载(2节车厢)如图2所示,分为地铁A型和B型车。荷载传力途径为轻轨列车轮载作用在钢轨上,钢轨将列车轮载经轨枕板传递给混凝土道床,道床板下方有橡胶垫层,将荷载扩散到钢箱梁顶板上。

#### 1.2.2 有限元模型

根据对称性原理,采用ANSYS建立主跨跨中12 m钢箱梁半幅模型,如图3所示,梁段对称面采用对称约束,梁端底板边缘简支约束。钢箱梁采用Shell63单元,桥面铺装、轨枕板及减振垫均采用实体单元Solid65。疲劳细节开孔横隔板处采用映射划分,单元边长为1 mm,其余位置采用自由划分,尺寸为50 mm×50 mm。面荷载横向宽度根据短轨

表 1 近年中国桥梁正交异性钢桥面板的构造参数取值

Tab. 1 Structural Parameters of Orthotropic Steel Bridge Deck in China in Recent Years

年份	桥名	顶板厚/mm	U 肋				横隔板	
			板厚/mm	高度/mm	开口宽/mm	间距/mm	板厚/mm	间距/mm
1997	虎门大桥	12	8	260	320	620	8	4 000
1999	江阴长江大桥	12	6	280	300	600	8	3 200
2000	厦门海沧大桥	12	6	280	300	600	8	3 000
2001	南京长江二桥南汊桥	14	8	184	300	600	10	3 750
2003	卢浦大桥	14	8	280	300	600	8	3 375
2005	润扬长江公路大桥	14	8	280	300	600	8	3 750
2006	桃夭门大桥	14	8	280	300	600	8	3 250
2007	阳逻长江公路大桥	14	8	280	300	600	8	3 200
2008	杭州湾大桥	14~20	8	280	300	600		3 750
2008	苏通大桥	14	8	300	300	600	10	4 000
2009	西堠门大桥	14	8	280	300	600	10	3 600
2009	香港昂船洲大桥	18	9	325	300	600	10	4 500
2011	南京大胜关长江大桥	16	6	260	300	600		3 000
2011	胶州湾大桥	16	8	280	300	600	10	3 600
2013	九江长江公路大桥	16	8	300	300	600	12	3 750
2013	嘉绍大桥	16	8	280	300	600	10	3 000
2017	高家花园复线桥	16	8	280	300	600	12	3 000
2018	港珠澳非通航孔桥	18	8	300	300	600	10	2 500

枕的尺寸取 0.45 m,纵向宽度根据荷载扩散效应取 2 倍短轨枕厚度 0.34 m,即将集中荷载等效为 0.45 m×0.34 m 的面荷载施加到节点群上。主要材料参数如表 2 所示。

1.2.3 关键细节疲劳应力影响范围

由于有限元模型无法考虑各细节中的焊缝构造和残余应力,如图 4 所示,根据常用的疲劳细节名义应力计算方法和表面外推热点应力法<sup>[21]</sup>的思路,各疲劳细节均选取主拉应力最大区域,具体位置规定如下:①疲劳细节 1 取距离焊缝和开口边缘 1 倍横隔板厚度的最大主拉应力处;②疲劳细节 2 取距离顶板和横隔板连接焊缝 1 倍顶板厚度的顶板最大主拉应力处,或距离 U 肋与横隔板连接焊缝 1 倍 U 肋厚度的 U 肋最大主拉应力处;③疲劳细节 3 取距离 1 倍横隔板厚度距离的横隔板开口最大主拉应力处;④疲劳细节 4 取附近应力较大的 U 肋底部最大主拉应力处。

为确定列车荷载的影响范围,采用城轨 A 型车单组车轮荷载 160 kN,在钢箱梁纵向上进行移动加载,选取横隔板的疲劳细节 3 位置作疲劳应力  $\sigma$  影响线,如图 5 所示,其中各疲劳细节纵向影响线变化趋势一致,图 5 中仅以应力最大的疲劳细节 3 为例。由图 5 可知:车轮荷载纵向移动时,对细节的疲劳应力满足“荷载对中应力最大”的原则,荷载影响范围

表现出显著的局部特征,在纵向上影响范围为轮载作用处左右 2 个横隔板间距。

1.3 列车荷载最不利加载位置

根据上述应力影响线分布规律确定出最不利的布载方式,如图 6 所示。前一车厢的轴 3、轴 4 荷载与后一车厢的轴 1 荷载可同时作用于该模型上。通过对比 2 种车型可知,城轨 A 型车疲劳荷载作用下结构受力更不利,因此选用城轨 A 型车作为疲劳荷载。

1.4 减振垫、吊点横隔板、轨下纵梁和道床板的影响分析

1.4.1 减振垫

为研究道床板与钢顶板不同接触方式对疲劳细节的影响,改变减振垫刚度,各细节的疲劳应力变化如图 7 所示,结果表明减振垫刚度对局部疲劳细节影响微弱,可忽略不计。

1.4.2 吊点横隔板

据工程统计,钢箱梁吊索支点竖向换算支撑刚度大多处于 3~30 kN·mm<sup>-1</sup> 的范围内,且纵向不同位置处,钢箱梁吊索支点竖向刚度不一样,甚至存在数量级的差别,为研究吊点竖向支撑对疲劳细节的影响,改变其竖向支撑刚度,针对竖向支撑刚度较大的情况,选择 50,100,1 000,10 000 kN·mm<sup>-1</sup> 作为研究参数,各细节的疲劳应力变化如图 8 所示。

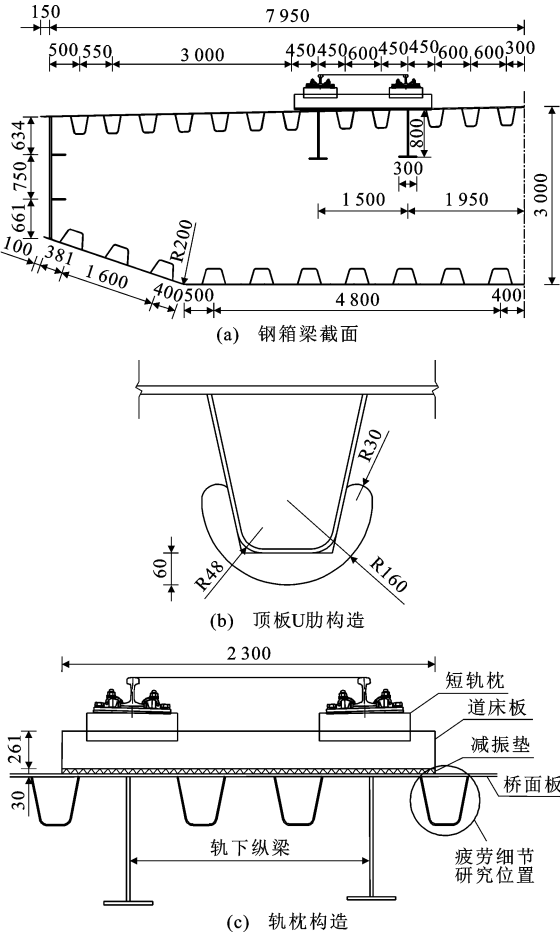


图 1 正交异性钢桥面及轨枕构造(单位:mm)

Fig. 1 Orthotropic Steel Bridge Deck and Structure of Sleeper Plate (Unit:mm)

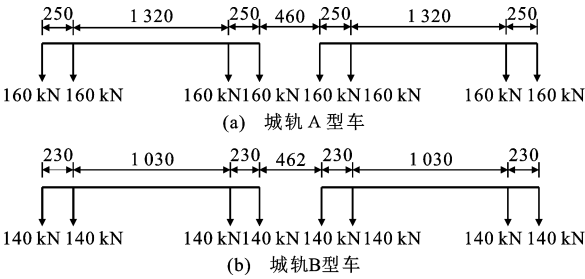


图 2 列车荷载(单位:cm)

Fig. 2 Train Load (Unit:cm)

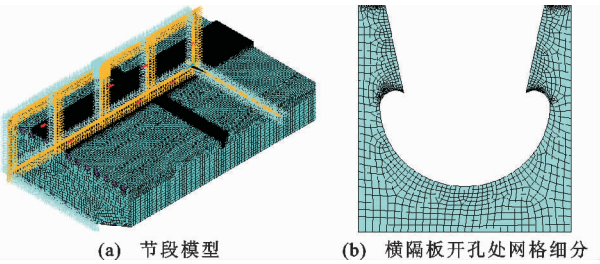


图 3 有限元模型

Fig. 3 Finite Element Model

表 2 材料特性  
Tab. 2 Material Properties

材料	弹性模量/MPa	泊松比
Q345q	206 000	0.300 0
C40	32 500	0.166 7

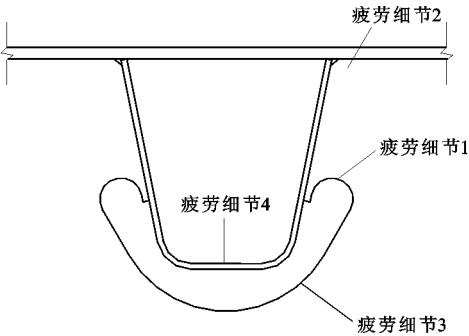


图 4 闭口肋疲劳细节

Fig. 4 Closed Rib Fatigue Detail

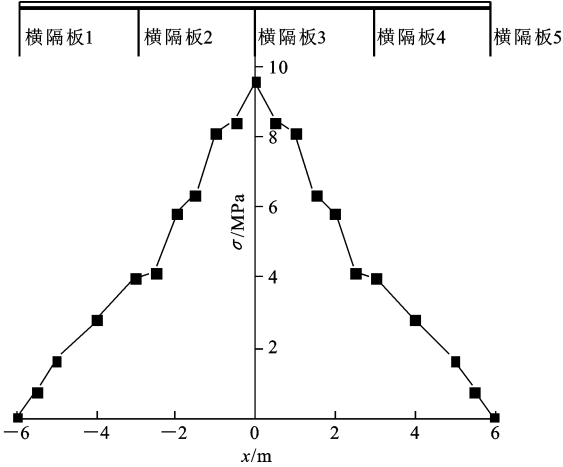


图 5 纵向移动荷载下疲劳应力影响线

Fig. 5 Influence Line of Fatigue Stress Under Longitudinal Moving Load

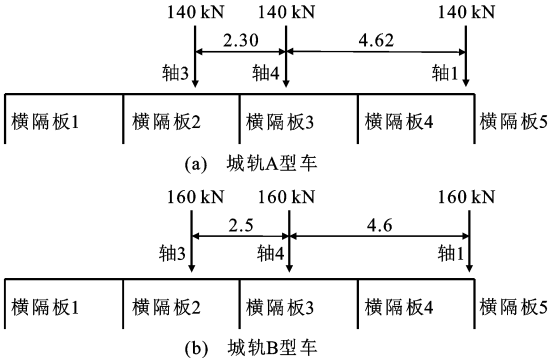


图 6 最不利布载位置(单位:m)

Fig. 6 Unfavorable Loading Position (Unit:m)

结果表明:随着支撑刚度变化,各细节疲劳应力变化不大,可忽略不计。

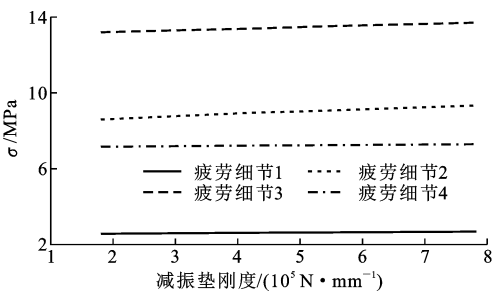


图 7 减振垫刚度对细节疲劳应力的影响  
Fig. 7 Influence of Damping Pad Stiffness on Fatigue Detail Stress

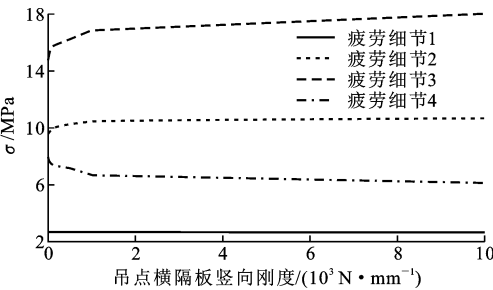


图 8 吊点横隔板竖向刚度对细节疲劳应力的影响  
Fig. 8 Influence of Suspended Diaphragm Height on Fatigue Detail Stress

1.4.3 轨下纵梁

轨下纵梁为轨道交通正交异性板钢箱梁桥的特殊构造,布置于钢轨正下方,为研究其刚度对疲劳细节的影响,取轨下纵梁高度 0.2~0.8 m 范围计算细节的疲劳应力,如图 9 所示。结果表明:轨下纵梁刚度对细节的疲劳应力有影响,刚度越大,疲劳应力越低,且对疲劳细节 3 的影响最显著。

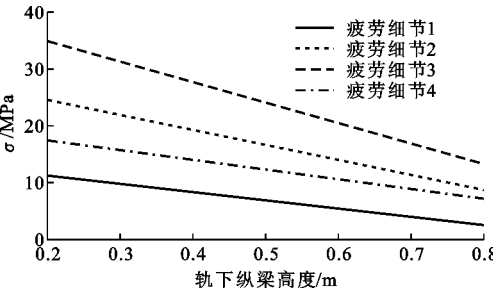


图 9 轨下纵梁高度对细节疲劳应力的影响  
Fig. 9 Influence of Stringer Height on Fatigue Detail Stress

1.4.4 混凝土道床板

对常见的整体式混凝土道床和等间距整体式混凝土道床进行细节的疲劳应力比较,如表 3 所示。2 种道床板对各细节的疲劳应力影响不大,考虑到整体式混凝土道床最常用,且荷载分布更均匀,因此本文计算基于整体式混凝土道床。道床板厚度对疲劳

表 3 2 种道床细节疲劳应力比较  
Tab. 3 Comparison of Fatigue Detail Stress Between Two Different Ballasts MPa

道床类型	疲劳细节 1	疲劳细节 2	疲劳细节 3	疲劳细节 4
整体式混凝土道床	2.58	8.62	13.20	7.17
等间距混凝土道床	3.01	9.21	14.13	8.01

细节的影响如图 10 所示,各细节的疲劳应力变化不大,本文选用工程常用的道床板厚度 261 mm。

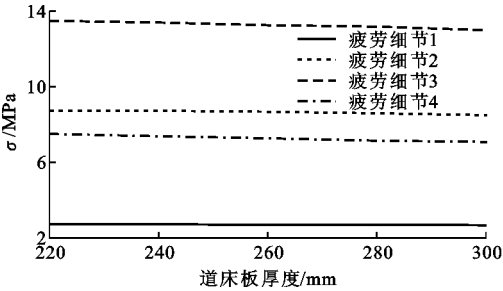


图 10 混凝土道床板厚度对细节疲劳应力的影响  
Fig. 10 Influence of Ballast Thickness on Fatigue Detail Stress

2 细节疲劳应力的正交化方法

2.1 基准计算模型

大量工程实桥设计参数统计如表 1 所示,顶板厚度取值范围 12~20 mm,U 肋厚度 6~9 mm,U 肋高度 260~320 mm,U 肋开口宽度 300~320 mm,U 肋间距 600~620 mm,横隔板厚度 8~12 mm,横隔板间距 3 000~4 000 mm。根据上述统计选取轨道交通桥梁 U 肋正交异性桥面板基准计算模型,如图 11 所示。纵向上有 4 个横隔板节间,横隔板间距 3 000 mm,横隔板高度 3 000 mm;箱梁顶板厚度 16 mm,腹板厚度 12 mm,底板厚度 12 mm,横隔板厚度 12 mm;轨下纵梁及整体道床板如图 1 所示,高度 800 mm,腹板厚度 20 mm,翼缘板尺寸 300 mm×20 mm,橡胶减振垫厚度 30 mm,道床板宽 2.3 m,厚度 261 mm;顶板 U 肋开孔形式有 2 种,如图 11(b)所示。根据对称性原理,建立基准计算模型尺寸的半幅有限元模型,如图 12 所示,按最不利加载位置施加城轨 A 型车荷载。

2.2 正交化方法

城轨钢箱梁正交异性桥面板构造在双线城轨列车荷载作用下,处于线弹性小变形状态,各疲劳细节关键影响参数的耦合作用可以忽略不计。通过大量参数计算发现:①闭口加劲肋的 2 种开孔形式下疲劳应力只在疲劳细节 3 位置处有较大差异,其余位置基本相同,因此下文仅将开孔形式 2 的疲劳细节

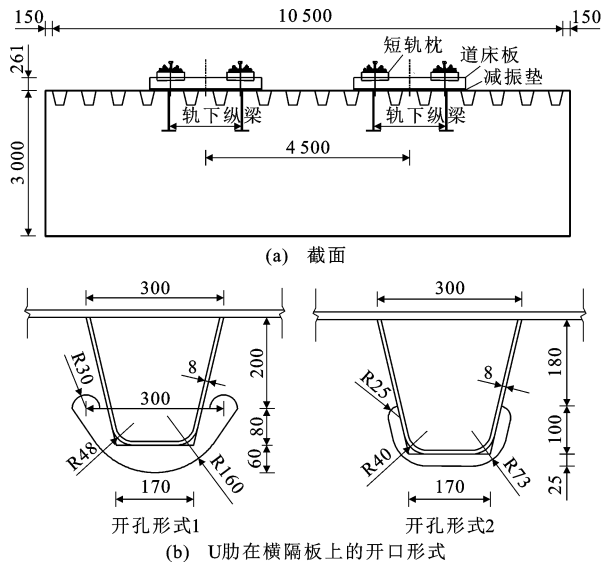


图 11 U 肋正交异性钢桥面基准计算模型截面 (单位:mm)

Fig. 11 Reference Model Cross-section of U-rib Orthotropic Steel Bridge Deck (Unit:mm)

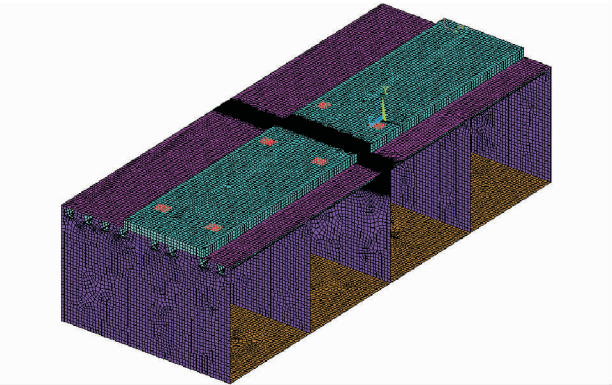


图 12 U 肋正交异性钢桥面基准计算模型

Fig. 12 Finite Element Model of Reference U-rib Orthotropic Steel Bridge Deck

3 单独研究(即疲劳细节 3');②U 肋厚度、横隔板厚度、轨下纵梁厚度、轨枕形式、减振垫刚度等对细节的疲劳应力影响不大,顶板厚度、横隔板高度、横隔板间距以及轨下纵梁高度对细节的疲劳应力影响显著。因此采用正交化方法,即根据细节的疲劳应力基准值及关键设计参数的影响系数,得到 U 肋正交异性钢桥面关键疲劳细节 1~4 位置处的疲劳应力,即

$$\sigma_i = (1 + \mu_f) \sigma_{0i} K_{1i} K_{2i} K_{3i} K_{4i} K_{hs} \quad (1)$$

式中: $\sigma_i$  为设计结构疲劳细节  $i$  处热点应力,  $i=1\sim 4$ ;  $\sigma_{0i}$  为典型基准结构各计算应力基准值,见表 3;  $1+\mu_f$  为运营动力系数,按  $1+\mu_f=1+\frac{18}{40+L}$  计算,  $L$  为正交异性钢桥面板两腹板间距;  $K_{1i}$ ,  $K_{2i}$ ,  $K_{3i}$ ,  $K_{4i}$

分别为顶板厚度影响系数、横隔板高度影响系数、横隔板间距影响系数及轨下纵梁高度影响系数,各影响系数可线性内插;  $K_{hs}$  为热点应力系数。

2.3 计算参数

通过空间有限元精细模型计算,得到正交异性板钢箱梁基准结构各细节疲劳应力值,同时根据城市轨道交通桥梁客流量统计的相关研究,疲劳设计时应在现有规范规定的列车荷载基础上乘以 0.75 的折减系数,所得疲劳应力结果见表 4。采用正交化方法,仅改变基准结构的单一参数,计算得到关键设计参数影响系数  $K$ ,如表 5~9 所示。

表 4 基准结构模型各细节的疲劳应力基准值  $\sigma_{0i}$

Tab. 4 Fatigue Detail Stress Values of Reference Structure Model

疲劳细节	1	2	3(3')	4
疲劳应力基准值 $\sigma_{0i}$ /MPa	2.12	6.44	10.33(13.13)	5.44

表 5 顶板厚度影响系数

Tab. 5 Influence Coefficients of Roof Thickness

顶板厚度/mm	疲劳细节 1	疲劳细节 2	疲劳细节 3(3')	疲劳细节 4
12	1.14	1.32	1.04(1.32)	1.14
14	1.07	1.16	1.02(1.16)	1.07
16	1.00	1.00	1.00(1.00)	1.00
18	0.94	0.84	0.98(0.84)	0.94

表 6 横隔板高度影响系数

Tab. 6 Influence Coefficients of Diaphragm Height

横隔板高度/m	疲劳细节 1	疲劳细节 2	疲劳细节 3(3')	疲劳细节 4
2.0	1.28	1.50	1.38(1.26)	1.06
2.5	1.13	1.25	1.15(1.13)	1.03
3.0	1.00	1.00	1.00(1.00)	1.00
3.5	0.75	0.64	0.84(0.93)	0.99
4.0	0.61	0.39	0.75(0.86)	0.99
4.5	0.56	0.35	0.67(0.8)	0.99
5.0	0.49	0.32	0.60(0.73)	0.99

表 7 横隔板间距影响系数

Tab. 7 Influence Coefficients of Diaphragm Spacing

横隔板间距/m	疲劳细节 1	疲劳细节 2	疲劳细节 3(3')	疲劳细节 4
3.0	1.00	1.00	1.00(1.00)	1.00
3.2	1.21	1.02	1.19(1.05)	1.09
3.4	1.42	1.03	1.28(1.10)	1.18
3.6	1.64	1.05	1.33(1.15)	1.27
3.8	1.85	1.06	1.43(1.20)	1.37
4.0	2.06	1.08	1.54(1.25)	1.47

3 算例验证

3.1 算例 1

以重庆环线高家花园大桥正交异性桥面板为

表 8 轨下纵梁高度影响系数

Tab. 8 Influence Coefficients of Stringer Height

轨下纵梁高度/m	疲劳细节 1	疲劳细节 2	疲劳细节 3(3')	疲劳细节 4
0.4	1.95	3.23	2.24(1.18)	2.09
0.5	1.72	2.68	1.94(1.14)	1.82
0.6	1.48	2.12	1.64(1.10)	1.55
0.7	1.24	1.57	1.33(1.05)	1.27
0.8	1.00	1.00	1.00(1.00)	1.00

表 9 热点应力系数  $K_{hs}$

Tab. 9 Hot Spot Stress Coefficient  $K_{hs}$

参数	疲劳细节 1	疲劳细节 2	疲劳细节 3/(3')	疲劳细节 4
$K_{hs}$	1.09	1.03	1.17(1.14)	1.12

例,在最不利加载情况下进行各关键细节的疲劳应力有限元值与正交化计算值对比,如表 10 所示。结果表明,两者相对误差均在 20%以内,采用正交化方法计算精度较高。

表 10 算例 1 细节的疲劳应力有限元值与正交化计算值对比

Tab. 10 Comparison of Fatigue Stress FEM Value and Its Orthogonalized Calculated Value of Example 1

参数	$\sigma_1$	$\sigma_2$	$\sigma_3$	$\sigma_4$
有限元应力/MPa	2.74	8.51	13.49	7.10
正交化计算应力/MPa	3.05	8.77	15.98	8.05
相对误差/%	11.31	3.06	18.46	13.38

3.2 算例 2

设某轨道交通钢箱梁正交异性板顶板厚度为 18 mm,U 肋厚度为 6 mm,U 肋开口宽度为 300 mm,U 肋间距为 300 mm,U 肋高度 260 mm,横隔板高度为 3.5 m,横隔板间距为 4 m,其他轨枕参数同典型结构的疲劳应力值对比如表 11 所示。

表 11 算例 2 细节的疲劳应力有限元值与正交化计算值对比

Tab. 11 Comparison of Fatigue Stress FEM Value and Its Orthogonalized Calculated Value of Example 2

参数	$\sigma_1$	$\sigma_2$	$\sigma_3$	$\sigma_4$
有限元应力/MPa	4.27	5.74	20.60	10.28
正交化计算应力/MPa	4.44	5.09	19.61	11.02
相对误差/%	3.98	11.32	4.81	7.20

4 结 语

(1)城轨 A 型车疲劳荷载作用下结构受力最不利,列车轮载纵向移动时,各细节疲劳应力满足“荷载对中应力最大”的原则,荷载影响范围表现出显著的局部特征:在纵向的影响范围为轮载作用处左右

2 个横隔板间距。

(2)减振垫刚度、道床板形式和吊点横隔板刚度对疲劳应力影响不大,轨下纵梁刚度对疲劳应力有显著影响。

(3)基于大量实际桥梁设计参数,提出城市轨道交通桥梁 U 肋正交异性桥面板基准计算模型,并采用有限元进行参数分析,得到关键设计参数的影响系数,建立 U 肋正交异性桥面板细节的疲劳应力计算正交化方法,并用算例验证了该方法的精度和适用性,可供设计参考使用。

参考文献:

References:

[1] 叶华文,徐 勋,强士中,等. 开口肋正交异性钢桥面板双轴疲劳试验及开孔形式研究[J]. 中国公路学报, 2013,26(1):87-92.  
YE Hua-wen, XU Xun, QIANG Shi-zhong, et al. Fa-tigue Test and Cut-out Shape Analysis of Orthotropic Steel Bridge Decks with Plate-shaped Longitudinal Ribs Under Biaxial Stress State[J]. China Journal of Highway and Transport, 2013, 26(1): 87-92.

[2] 叶华文,徐 勋,强士中,等. 开口肋正交异性钢桥面板疲劳设计参数研究[J]. 西南交通大学学报, 2012, 47(3):379-386.  
YE Hua-wen, XU Xun, QIANG Shi-zhong, et al. Fa-tigue Design Parameters for Orthotropic Steel Decks of Single Plane Cable-stayed Bridges[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2012, 47(3): 379-386.

[3] SIM H B, UANG C M. Stress Analyses and Parametric Study on Full-scale Fatigue Tests of Rib-to-deck Welded Joints in Steel Orthotropic Decks[J]. Journal of Bridge Engineering, 2012, 17(5): 765-773.

[4] 孔祥明,吉伯海,傅中秋,等. 钢桥面板典型细节疲劳应力及变形特征分析[J]. 工业建筑, 2017, 47(5): 6-11.  
KONG Xiang-ming, JI Bo-hai, FU Zhong-qiu, et al. Research of Fatigue Stress and Deformation Characteristics of Typical Details of Steel Bridge Deck[J]. Industrial Construction, 2017, 47(5): 6-11.

[5] 陶晓燕. 正交异性钢桥面板节段模型疲劳性能试验研究[J]. 中国铁道科学, 2013, 34(4): 22-26.  
TAO Xiao-yan. Experimental Study on the Fatigue Performance of the Section Model of Orthotropic Steel Bridge Deck[J]. China Railway Science, 2013, 34(4): 22-26.

[6] 王春生,付炳宁,张 芹,等. 正交异性钢桥面板足尺疲劳试验[J]. 中国公路学报, 2013, 26(2): 69-76.

- WANG Chun-sheng, FU Bing-ning, ZHANG Qin, et al. Fatigue Test on Full-scale Orthotropic Steel Bridge Deck [J]. China Journal of Highway and Transport, 2013, 26(2): 69-76.
- [7] 张清华, 崔 闯, 卜一之, 等. 港珠澳大桥正交异性钢桥面板疲劳特性研究[J]. 土木工程学报, 2014, 47(9): 110-119.
- ZHANG Qing-hua, CUI Chuang, BU Yi-zhi, et al. Study on Fatigue Features of Orthotropic Decks in Steel Box Girder of Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge [J]. China Civil Engineering Journal, 2014, 47(9): 110-119.
- [8] 叶华文, 徐 勋, 强士中, 等. 重庆两江大桥正交异性钢桥面板疲劳性能试验研究[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2013, 44(2): 749-756.
- YE Hua-wen, XU Xun, QIANG Shi-zhong, et al. Fatigue Test of Orthotropic Steel Bridge Deck in Chongqing Liangjiang Bridge [J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2013, 44(2): 749-756.
- [9] 叶华文, 王应良, 张清华, 等. 新型正交异性钢-混组合桥面板足尺模型疲劳试验[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2017, 49(9): 25-32.
- YE Hua-wen, WANG Ying-liang, ZHANG Qing-hua, et al. Full-scale Fatigue Test of New Steel-concrete Composite Orthotropic Bridge Deck [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2017, 49(9): 25-32.
- [10] Eurocode 3: Design of Steel Structures — Part 1-9: Fatigue Strength of Steel Structures [S].
- [11] JTG D64—2015, 公路钢结构桥梁设计规范 [S].
- JTG D64—2015, Specifications for Design of Highway Steel Bridge [S].
- [12] GB/T 51234—2017, 城市轨道交通桥梁设计规范 [S].
- GB/T 51234—2017, Code for Design of Urban Rail Transit Bridge [S].
- [13] 吴臻旺. 公路悬索桥钢箱梁正交异性板桥面局部应力影响面与包络面和简化计算研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2013.
- WU Zhen-wang. Research on Influence Surfaces, Enveloping Surfaces and Simplified Calculation of Local Stresses of Orthotropic Deck in Steel Box Girder for Highway Suspension Bridge [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2013.
- [14] 王万威. 钢桥面板 U 肋与横隔板焊缝疲劳特性分析 [D]. 成都: 西南交通大学, 2018.
- WANG Wan-wei. Fatigue Properties Analysis of Welded Joints of U-ribs and Diaphragms on Steel Bridge Deck [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018.
- [15] 胡劼成. 正交异性钢-混组合 U 肋桥面板扭转变形研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2019.
- HU Jie-cheng. Torsional Behavior of Orthotropic Steel-concrete Composite Bridge Deck with U-rib [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2019.
- [16] 黄 卫. 大跨径桥梁钢桥面铺装设计 [J]. 土木工程学报, 2007, 40(9): 65-77.
- HUANG Wei. Design of Deck Pavement for Long-span Steel Bridges [J]. China Civil Engineering Journal, 2007, 40(9): 65-77.
- [17] 东南大学. 润扬长江公路大桥试验桥钢桥面铺装研究 [R]. 南京: 东南大学, 2004.
- Southeast University. Research of Test Bridge Steel Deck Pavement of Run Yang Yangtze River Bridge [R]. Nanjing: Southeast University, 2004.
- [18] 东南大学. 南京长江第二大桥钢桥面环氧沥青混凝土铺装技术及应用 [R]. 南京: 东南大学, 2000.
- Southeast University. Apply Epoxy Asphalt to Nanjing Second Yangtze River Bridge's Orthotropic Steel Deck Plate [R]. Nanjing: Southeast University, 2000.
- [19] 张 磊. 江阴大桥钢桥面铺装病害研究 [D]. 南京: 东南大学, 2004.
- ZHANG Lei. Research on Deterioration of Jiangyin Bridge Deck Pavement [D]. Nanjing: Southeast University, 2004.
- [20] 东南大学. 舟山桃夭门大桥钢桥面铺装研究报告 [R]. 南京: 东南大学, 2003.
- Southeast University. Apply Epoxy Asphalt to Taoyaomen Bridge's Orthotropic Steel Deck Plate in Zhoushan City [R]. Nanjing: Southeast University, 2003.
- [21] 周张义, 李 芾, 安琪, 等. 钢结构焊缝疲劳强度分析技术的最新进展 [J]. 中国铁道科学, 2009, 30(4): 69-75.
- ZHOU Zhang-yi, LI Fu, AN Qi, et al. Latest Development of Fatigue Strength Analysis Technology for Welds in Steel Structures [J]. China Railway Science, 2009, 30(4): 69-75.