

## 模数式桥梁伸缩缝动力强度计算与影响因素分析

邹毓颖<sup>1</sup>, 吕俊平<sup>2</sup>, 丁勇<sup>1\*</sup>, 俞丹波<sup>1</sup>, 吕建华<sup>3</sup>

(1.宁波大学 建筑工程与环境学院, 浙江 宁波 315211; 2.浙江临金高速公路有限公司, 浙江 杭州 310000;

3.宁波路宝科技实业集团有限公司, 浙江 宁波 315800)

**摘要:** 为了分析桥梁伸缩缝在车辆冲击荷载作用下损坏的机理, 对桥梁工程中常用的模数式伸缩缝建立了有限元模型, 提出了其在车轮冲击荷载作用下的动力响应计算方法, 以及非对称循环荷载作用下结构脉动强度的分析方法. 对典型的 RBM160 型桥梁伸缩缝进行了动力强度计算与影响因素分析. 结果表明: (1)伸缩缝中梁跨中、中梁支座焊缝位置是动应力最大的位置, 计算结果与实际工程中常见的伸缩缝破坏位置一致; (2)水平与竖向轮载共同作用下结构的最大应力显著大于竖向轮载单独作用, 说明水平轮载对伸缩缝损坏影响较大, 但是国内外规范关于水平轮载的取值存在差别, 由此获得的伸缩缝最大应力差别较大; (3)伸缩缝最大应力随着汽车车速的增大而增大, 可以通过限制车速来控制模数式伸缩缝的最大应力, 确保结构的安全性; (4)中梁与横梁之间的焊缝是伸缩缝结构的最薄弱部位, 该部位的最大应力与焊缝饱满度有关, 通过优化焊缝饱满度可以减小最大应力, 提高结构安全性.

**关键词:** 模数式桥梁伸缩缝; 水平轮载; 冲击荷载; 有限元; 动力强度分析

**中图分类号:** U443.37

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1001-5132 (2019) 01-0072-08

伸缩缝作为桥梁结构中长期暴露在外的的重要组成部分, 很容易在轮压荷载的反复作用下受到损坏. 虽然其造价仅占桥梁建设费用的 1%, 但目前 20% 以上的维护经费都用于伸缩缝<sup>[1-2]</sup>. 因此, 桥梁伸缩缝的强度与疲劳问题成为了国内外众多学者研究的热点之一<sup>[3-5]</sup>.

贺智勇等<sup>[6]</sup>、梁爱军<sup>[7]</sup>分别采用 ANSYS、MIDAS CIVIL 对当地常用模数式伸缩缝进行了建模, 分析了疲劳寿命及其影响因素. 孙正峰等<sup>[8]</sup>建立了模数式伸缩缝的有限元模型, 研究了车轮对中梁的水平冲击以及中梁水平位移的影响因素. Coelho 等<sup>[9]</sup>利用当地桥梁伸缩缝的实测资料, 结合数值分析研究了模数式伸缩缝的动力响应及其影响因素. Ding 等<sup>[10]</sup>提出了一种基于分布式弹簧阻尼单元的数值分析方法, 对车辆通过伸缩缝时的竖向轮压荷载及其冲击系数进行了定量研究.

Stamatopoulos<sup>[11]</sup>提出了一种综合性程序来估计模数式伸缩缝以及中梁与横梁连接处的疲劳寿命, 指出连接处的构造不良会导致伸缩缝发生疲劳破坏. 吴昊等<sup>[12]</sup>通过 ANSYS 建立参数化模型研究了模数式伸缩缝的固有频率、结构参数灵敏度及其影响因素. 上述研究主要考虑了伸缩缝在单个方向上轮载的作用, 而且以竖向轮载为主, 很少考虑竖向与水平轮载共同作用下伸缩缝的动力响应与强度问题. 因此, 有必要研究在水平与竖向轮载共同作用下伸缩缝结构的动力强度问题, 并在此基础上进行结构优化.

本文以桥梁工程中常用的 RBM160 型伸缩缝为例, 提出了模数式桥梁伸缩缝的动力强度计算方法, 期间建立了包含竖向与水平分量的移动轮压荷载模型、精细化的伸缩缝有限元模型, 分析了车轮通过伸缩缝时的结构瞬态应力时程. 然后根

收稿日期: 2018-07-08.

宁波大学学报(理工版) 网址: <http://journal.g.nbu.edu.cn/>

基金项目: 浙江省自然科学基金 (LY19E080009); 浙江省交通运输厅科技计划项目 (2015-2-47); 宁波市交通运输科技项目 (201604); 宁波市科技服务业示范项目 (2015F1008).

第一作者: 邹毓颖 (1993-), 男, 浙江嘉兴人, 在读硕士研究生, 主要研究方向: 桥梁工程. E-mail: 598160587@qq.com

\*通信作者: 丁勇 (1975-), 男, 浙江余姚人, 博士/教授, 主要研究方向: 桥梁工程与计算结构力学. E-mail: dingyong@nbu.edu.cn

据脉动强度的分析方法,确定了模数式伸缩缝结构的薄弱位置.在此基础上,研究了伸缩缝脉动强度的影响因素,针对性地提出了车辆速度管控建议与焊缝结构优化方法,从而为桥梁伸缩缝的长期安全服役提供了技术支持.

## 1 模型与算法

### 1.1 模数式伸缩缝与车辆荷载

#### 1.1.1 模数式伸缩缝结构

图1为典型的双缝模数式伸缩缝——RBM160型模数式伸缩缝,主要结构包括2根“Z”字形的边梁、1根“王”字形的中梁、车行道位移箱、横梁组件、锚固组件等.其中车行道位移箱与横梁组件是由压紧支座、承压支座、控制弹簧、挡板、横梁和横梁支撑块等部分组成.该伸缩缝的中梁与横梁之间利用横梁支撑块采用四面围焊的焊接形式进行连接,两根边梁则分别通过锚固组件与路面混凝土紧密相连.

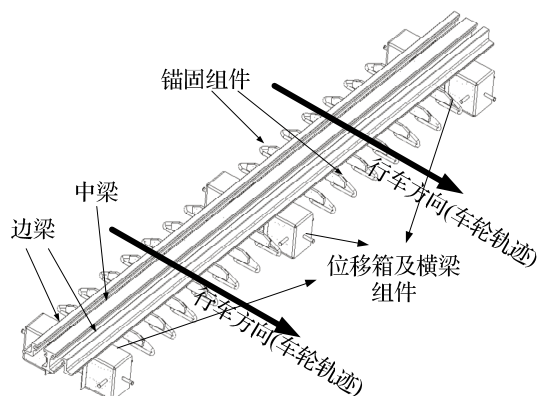


图1 桥梁伸缩缝结构

#### 1.1.2 车辆轮压荷载

对于作用在伸缩缝上的车轮荷载(图1),国内外有不同的取值方法:

(1)国内参考《公路桥涵设计通用规范》<sup>[13]</sup>的规定:竖向轮载取车辆荷载后轴重力标准值140 kN和 $(1+\mu)$ 的乘积值,其中冲击系数 $\mu$ 取0.3,得 $140\text{ kN}\times 1.3=182\text{ kN}$ .水平轮载取车辆荷载后轴重力产生的制动力42 kN.

(2)国外参考Steenbergen<sup>[14]</sup>的研究结果.

竖向轮载为:

$$F_{\text{vert}}(t) = \frac{R + nk_{\text{tyre}}\mu_0}{2ni} (1 - \cos \frac{2\pi t}{T}), \quad (1)$$

其中: $R$ 为车辆轴重; $n$ 为每轴轮数; $i$ 为车轮荷载作用的中梁数; $\mu_0$ 为中梁的竖向不均匀度; $k_{\text{tyre}}$ 为车轮的径向刚度.

水平轮载:车速越大,水平轮载越大,当车速达到 $80\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 时,水平轮载为竖向轮载的10%.

RBM160型模数式伸缩缝中梁宽度为0.074 m,假设在平常路面上,车轮与路面的接触面形状是一个长0.2 m,宽0.5 m的矩形.经计算,作用在单个中梁上的车轮荷载见表1.

表1 作用于单个中梁上的最大车轮荷载 kN

| 规范                 | 竖向轮载 | 水平轮载 |
|--------------------|------|------|
| 国内 <sup>[13]</sup> | 34   | 7.8  |
| 国外 <sup>[14]</sup> | 35   | 3.5  |

由表1可知,国内外规范对于竖向轮载的取值比较接近,而水平轮载的取值差异较大.因此,本文在后续分析中将竖向轮轴荷载一致取为182 kN,水平轮载按照国内外方法分别取值.

由于车轮的移动,作用在伸缩缝中梁上的轮压荷载要考虑接触面积的变化(图2),车轮经过伸缩缝中梁时,轮压面积随时间先逐渐增大,再保持不变,最后逐渐减小.因此,伸缩缝中梁上的车轮荷载随时间变化.

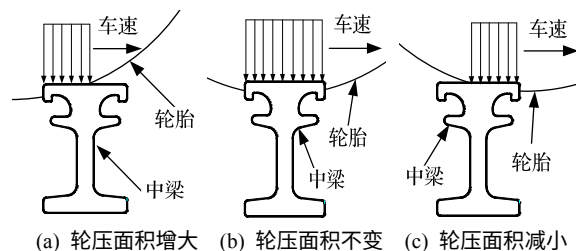


图2 伸缩缝中梁上的轮压荷载变化过程

## 1.2 有限元建模与动力学分析方法

### 1.2.1 有限元建模

对图1所示的桥梁伸缩缝结构,建立有限元模型(图3),模型共分六跨,每跨1.9 m,共计11.4 m,用于模拟三车道桥梁采用的伸缩缝.模型共划分了120 592个单元,单元种类以计算精度较好的8结点六面体单元为主,少数几何形状复杂的地方采用4结点四面体单元.8结点六面体采用线性减缩积分,减缩积分得到的位移和应力结果比较精确,计算时间则较完全积分短,整体模型见图3(a).中梁跨中、中梁支座焊缝位置是结构在车轮荷载作

用下应力最大的位置(图 3(b)和(c)). 有限元网格的密度与应力集中程度有关, 中梁跨中应力集中程度较小, 最小单元边长约为 3.6 mm. 中梁支座焊缝则是实际工程中经常发生破坏的位置, 因此, 该处建立了更为精细化的网格, 如图 3(d)所示. 焊缝整体进一步进行了网格加密, 主要位置采用精度较好的 8 结点线性六面体单元, 最小单元边长为 0.5 mm, 从而获得较为准确的应力结果.

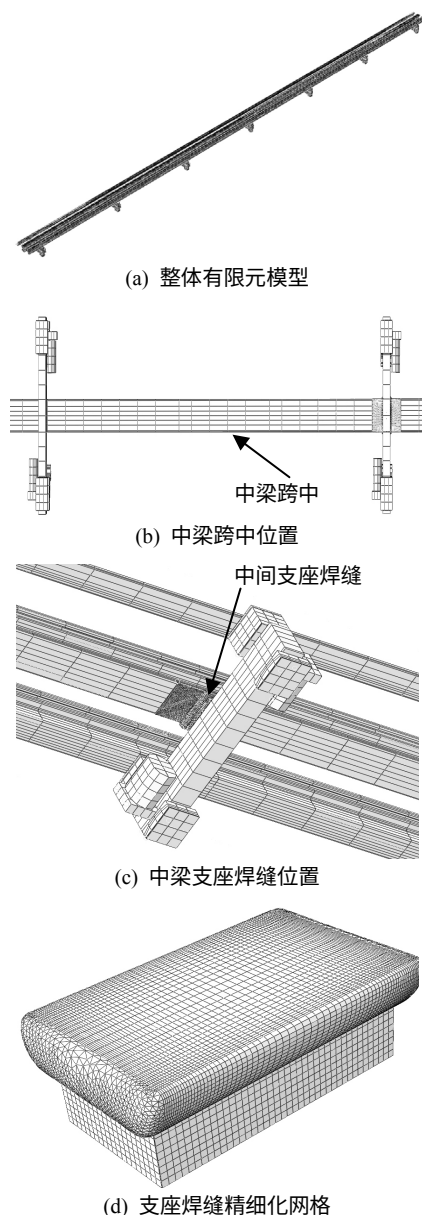


图 3 伸缩缝结构有限元模型

### 1.2.2 动力学分析方法

为了分析伸缩缝结构的动力响应, 建立式(2)所示的有限单元法基本方程:

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = P(t), \quad (2)$$

其中:  $\ddot{u}$ 、 $\dot{u}$  和  $u$  分别为节点加速度、速度和位移向量;  $M$ 、 $C$ 、 $K$  分别为质量、阻尼、刚度矩阵;  $P(t)$  为外荷载向量.

利用 ABAQUS 软件中的 Newmark 法求解方程 (2). 阻尼采用常用的 Rayleigh 阻尼:

$$C = \alpha M + \beta K, \quad (3)$$

阻尼参数  $\alpha$  和  $\beta$  采用式(4)计算:

$$\begin{cases} \alpha \\ \beta \end{cases} = \frac{2\zeta}{\omega_i + \omega_j} \begin{pmatrix} \omega_i \omega_j \\ 1 \end{pmatrix}, \quad (4)$$

其中:  $\omega_i$  和  $\omega_j$  分别为第  $i$  和第  $j$  阶自振圆频率;  $\zeta$  为振型阻尼比.

为了得到 Rayleigh 阻尼参数  $\alpha$  和  $\beta$ , 本文对伸缩缝进行了模态分析, 得到振动模态如图 4 所示.  $\omega_i$  和  $\omega_j$  要覆盖动力学分析的主要频率, 因此本文选取了水平一阶振动模态下的频率  $\omega_1$  (41.33 Hz) 和竖向一阶振动模态下的频率  $\omega_7$  (92.42 Hz), 按式(4)计算, 得到主要材料的阻尼参数见表 2.

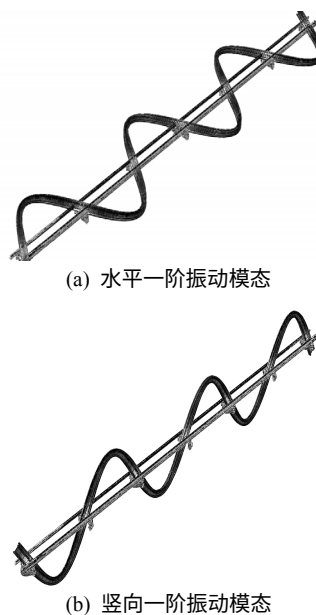


图 4 模数式伸缩缝竖向振动模态

表 2 材料 Rayleigh 阻尼参数

| 材料种类 | 阻尼比  | $\alpha$ | $\beta$   |
|------|------|----------|-----------|
| 钢材   | 0.03 | 1.713 5  | 0.000 449 |
| 氯丁橡胶 | 0.05 | 2.855 9  | 0.000 748 |

### 1.3 脉动强度分析方法

根据前人所做的大量实验, 在非对称循环荷载作用下材料的破坏应力幅值  $\sigma_{ra}$  可以按以下公式

计算<sup>[15]</sup>:

$$\sigma_{ra} = \sigma_{-1} \left[ 1 - n_1 \frac{\sigma_{rm}}{\sigma_b} - n_2 \left( \frac{\sigma_{rm}}{\sigma_b} \right)^2 \right]. \quad (5)$$

Gerber 取式(5)中  $n_1 = 0, n_2 = 1$  得到一个抛物线关系式<sup>[16]</sup>, 在脉动荷载作用下,  $\sigma_{rm} = \sigma_{ra}$ , 此时强度极限的算法为:

$$\frac{\sigma_{ra}}{\sigma_b} = \frac{1}{2} \left[ -\frac{\sigma_b}{\sigma_{-1}} + \sqrt{\left( \frac{\sigma_b}{\sigma_{-1}} \right)^2 + 4} \right], \quad (6)$$

式中:  $\sigma_{ra}$  为引起破坏的脉动应力幅值;  $\sigma_{-1}$  为  $R=-1$  时对应的等寿命应力幅值;  $\sigma_s$  为材料屈服极限;  $\sigma_b$  为材料强度极限。

脉动荷载下的破坏强度为:

$$\sigma_f = 2\sigma_{ra}. \quad (7)$$

本文伸缩缝中梁以及焊缝材料为 Q345B 级钢材, 材料性质见表 3。按照式(6)计算, 得到破坏应力幅值  $\sigma_{ra}$ ; 然后再按照式(7)计算, 最终得到脉动破坏强度  $\sigma_f$  为 281 MPa。

表 3 Q345B 钢材材料性质

| 强度极限/MPa | 屈服极限/MPa | 弯曲疲劳极限/MPa | 弹性模量/GPa | 泊松比 |
|----------|----------|------------|----------|-----|
| 550      | 345      | 150        | 206      | 0.3 |

## 2 实例分析与讨论

对图 1 和图 2 中车轮荷载通过模数式伸缩缝的全过程进行动力有限元分析。为讨论水平与竖向轮载的影响, 分别选取 3 种荷载工况(表 4)。工况 1: 仅考虑竖向轮载作用下的模数式伸缩缝动力强度, 根据 1.1.2 节, 竖向轮载取考虑冲击系数后的轴重, 即 182 kN。工况 2 和工况 3: 模拟竖向轮载与水平轮载共同作用下的伸缩缝动力强度。由表 1 可以知道, 国内外竖向轮载取值比较接近, 而水平轮载差别较大。因此, 工况 2 的轮载轴重参考国外 Steenberg<sup>[14]</sup>的研究结果取值, 工况 3 则按国内规范取值<sup>[13]</sup>。

表 4 荷载工况及其对应的轴重

| 工况   | 轮载/kN              |
|------|--------------------|
| 工况 1 | 竖向轮载 182           |
| 工况 2 | 竖向轮载 182+水平轮载 18.2 |
| 工况 3 | 竖向轮载 182+水平轮载 42   |

### 2.1 热点应力时程

实例分析结果表明, RBM160 型模数式伸缩缝的中梁跨中、中梁支座焊缝位置是结构在车辆轮胎荷载作用下的应力最大的位置(热点), 如图 3(b)和(c)所示。本文分别计算 3 种荷载工况下模数式伸缩缝热点的 Mises 应力, 并提取了车速 40 km·h<sup>-1</sup> 时中梁跨中和中梁支座焊缝的热点应力时程。

中梁跨中位置在 3 种工况下的热点应力时程如图 5 所示。由图 5 可知, 工况 1 时最大 Mises 应力为 73.1 MPa, 工况 2 时为 94.0 MPa, 工况 3 时为 163.1 MPa。3 种工况下中梁跨中位置的最大 Mises 应力均小于中梁材料(Q345B 级钢)的屈服强度, 即 345 MPa, 也小于脉动破坏强度(281 MPa), 因此不会产生静力或动力强度破坏。

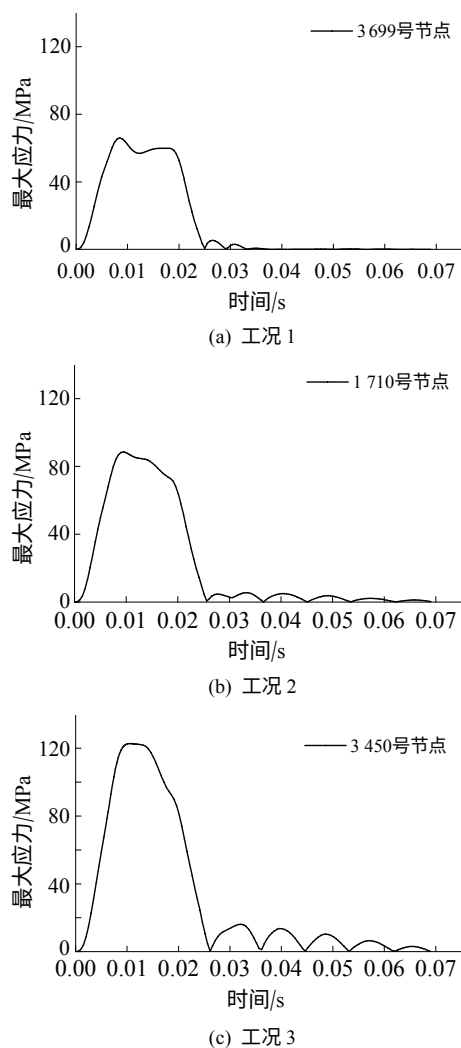


图 5 不同工况下中梁跨中位置热点应力时程

根据 1.1.2 节, 当轮压面积完全覆盖伸缩缝中

梁时, 中梁所受车轮荷载最大, 此时焊缝结构的 Mises 应力如图 6 所示. 从图 6 可以看出, 3 种工况下的最大应力都在焊缝角点处.

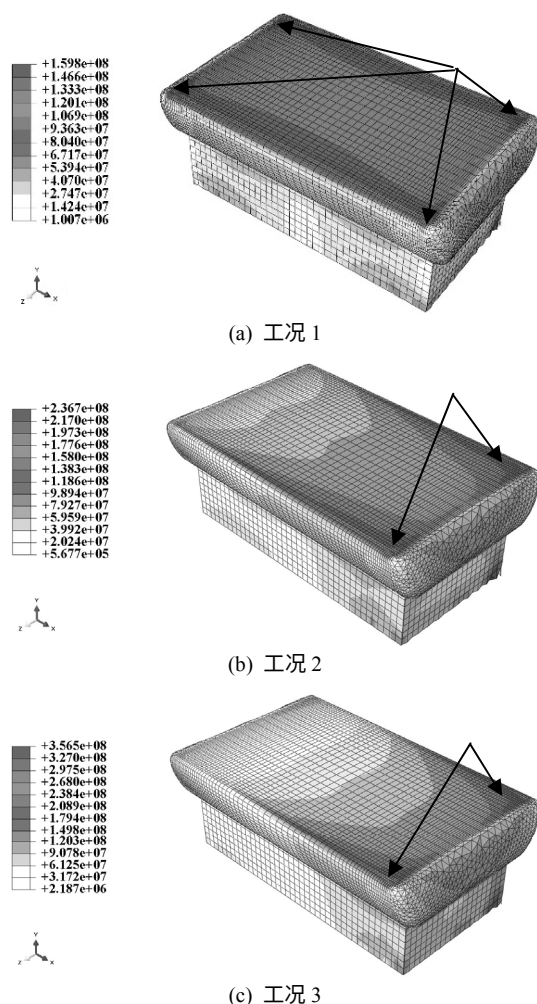


图 6 焊缝位置的 Mises 应力云图

在 3 种工况下, 中梁支座焊缝位置的热点应力时程如图 7 所示, 其中工况 1 的最大 Mises 应力为 159.8 MPa, 工况 2 的最大 Mises 应力为 236.7 MPa, 这 2 种工况的最大 Mises 应力均小于 Q345B 级钢材的屈服强度(345 MPa), 小于脉动强度(281 MPa), 都不会发生强度破坏. 而工况 3 时, 最大 Mises 应力为 343.9 MPa, 接近屈服强度, 超过了脉动强度.

由上述分析可知, 当 RBM160 型模数式伸缩缝仅在竖向车轮荷载作用下不会发生强度破坏, 而在水平轮载与竖向轮载共同作用时, 结构热点应力增大, 特别是选用较大的水平轮载时, 即按国内设计规范的水平轮载取值时, 伸缩缝中梁支座焊缝位置容易发生强度破坏, 因此水平轮载的取

值对伸缩缝强度设计有不可忽略的作用.

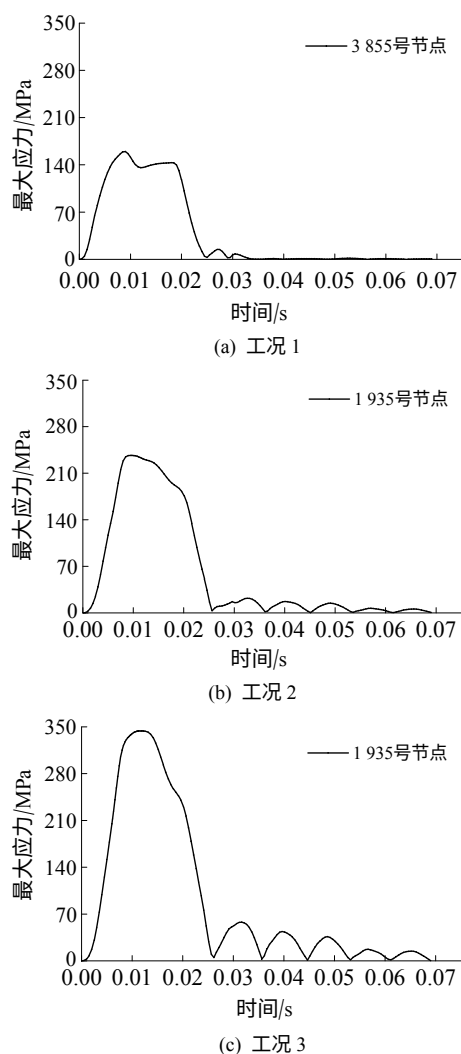


图 7 不同工况下中梁支座焊缝位置热点应力时程

## 2.2 热点应力的影响因素分析

以中梁支座的焊缝凸度、车辆行驶速度为例, 对影响伸缩缝结构热点应力的主要因素进行分析.

### 2.2.1 焊缝凸度对最大应力的影响

分析结果表明, 伸缩缝结构中梁与横梁之间的焊缝饱满程度对热点应力有较大的影响, 这种饱满程度可以用焊缝焊趾位置切线与虚线的夹角, 或者焊缝凸度来表示(图 8). 因此, 建立 7 种饱满程度的焊缝模型(图 9), 夹角分别为  $15^\circ$ 、 $20^\circ$ 、 $25^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $35^\circ$ 、 $40^\circ$ 、 $45^\circ$ ; 凸度分别为 4.472、5.501、6.530、7.560、8.592、9.622、10.652 mm. 分析车轮以  $40 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$  速度通过伸缩缝时的焊缝最大 Mises 应力. 结果表明, 对于同一种工况, 焊缝最大 Mises 应力结点的位置在不同焊缝饱满度下均没有发生变化.

图 10 为 3 种工况下, 中梁支座焊缝在不同焊缝饱满程度下的最大 Mises 应力. 从图 10 可以看出, 夹角为  $20^\circ$  (凸度为 5.501 mm) 时的最大 Mises 应力最小, 因此焊接施工中焊缝饱满程度可以控制在夹角  $20^\circ$ , 凸度 5.501 mm 左右.

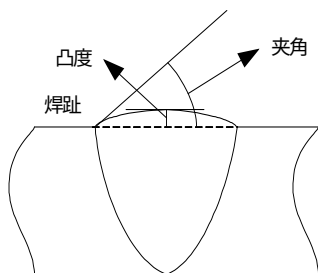


图 8 区分焊缝饱满程度的夹角位置示意图

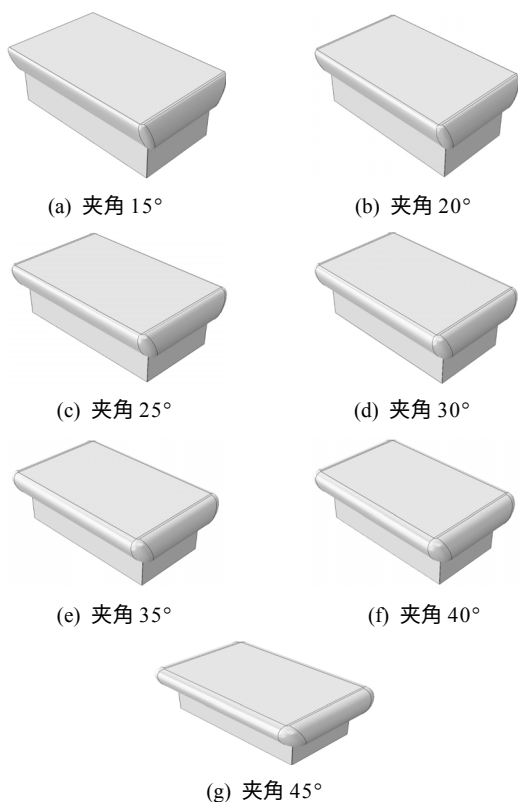
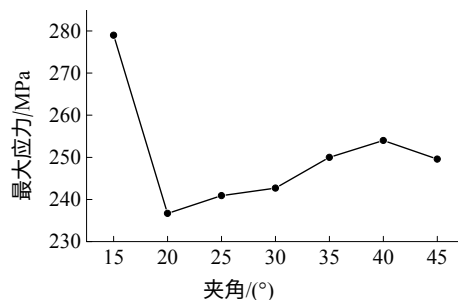
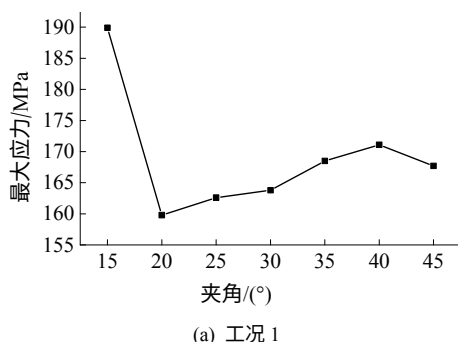
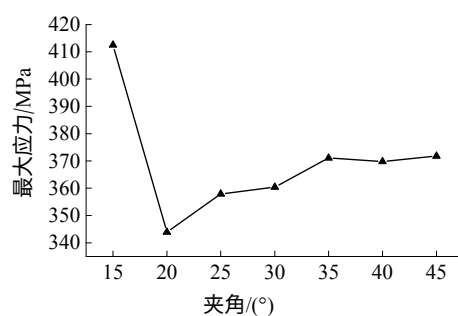


图 9 不同焊缝凸度的焊缝饱满程度模型



(b) 工况 2



(c) 工况 3

图 10 不同工况下焊缝饱满程度与焊缝结点的最大 Mises 应力关系曲线

### 2.2.2 车速对最大应力的影响

为了研究车速对伸缩缝最大应力的影响, 针对表 4 的 3 种工况, 计算在  $20\sim 80\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$  不同车速下中梁跨中以及焊缝位置(焊缝凸度取 5.501 mm)的最大 Mises 应力, 两者关系如图 11 和 12 所示.

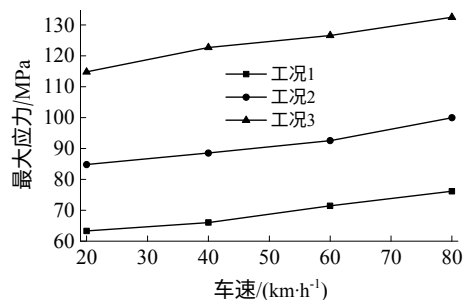


图 11 不同工况下中梁跨中位置最大 Mises 应力与车速关系曲线

3 种工况下中梁跨中位置和中梁支座焊缝位置处的最大 Mises 应力均随着车速的增大而增大. 对于中梁跨中位置, 在 3 种工况下, 不同车速时的最大 Mises 应力均没有超过中梁钢材 Q345B 钢材的屈服强度(345 MPa)和脉动强度(281 MPa), 不会发生强度破坏. 对于中梁支座焊缝位置, 在工况 1 与工况 2 下, 不同车速时的最大 Mises 应力也都没有超过中梁钢材 Q345B 钢材的屈服强度(345 MPa)和

脉动强度(281 MPa), 不会发生强度破坏. 但在工况 3 下, 当车速大于  $40 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$  时, 最大 Mises 应力已超过了 Q345B 钢材的屈服强度. 因此, 可以通过限制车辆通过模数式伸缩缝的速度来控制热点应力不超过屈服强度, 但是脉动强度则在大于  $20 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$  车速时即已超过.

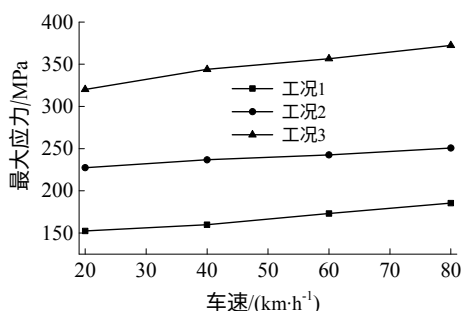


图 12 不同工况下中梁支座焊缝位置最大 Mises 应力与车速关系曲线

汇总不同工况、不同车速下伸缩缝关键位置的最大 Mises 应力(表 5). 3 种工况下伸缩缝中梁的最大应力均小于 Q345B 钢材的脉动破坏强度 (281 MPa), 因此不会造成脉动强度破坏; 而对于中梁支座焊缝位置, 工况 1 和工况 2 的最大应力均小于脉动强度, 工况 3 在不同车速下的最大应力均已超过 Q345B 钢材的脉动破坏强度.

表 5 伸缩缝关键位置的最大 Mises 应力

| 关键位置           | 不同工况 | 车速/(km·h <sup>-1</sup> ) |     |     |     |
|----------------|------|--------------------------|-----|-----|-----|
|                |      | 20                       | 40  | 60  | 80  |
| 中梁跨中<br>应力/MPa | 工况 1 | 63                       | 66  | 71  | 76  |
|                | 工况 2 | 85                       | 89  | 93  | 100 |
|                | 工况 3 | 115                      | 123 | 127 | 133 |
| 焊缝应<br>力/MPa   | 工况 1 | 152                      | 160 | 173 | 185 |
|                | 工况 2 | 227                      | 237 | 243 | 251 |
|                | 工况 3 | 320                      | 344 | 357 | 372 |

### 3 结论

提出了水平与竖向车轮荷载共同作用下模数式桥梁伸缩缝的动力响应分析方法, 以及脉动强度判断准则, 通过实例计算与参数分析, 得到如下结论:

(1)中梁跨中和中梁支座焊缝是模数式伸缩缝结构应力最大的位置, 其中中梁支座焊缝更是早期破坏的位置. 因此, 在施工过程中应特别重

视该部位的施工质量.

(2)中梁支座焊缝的最大应力与焊缝结构的饱满程度有关. 实例分析中, 焊缝饱满度夹角在  $20^\circ$  左右时, 最大 Mises 应力最小. 因此在中梁支座焊缝的施工中, 可以通过控制焊缝结构的饱满程度来降低最大应力.

(3)随着车辆速度的增大, 中梁跨中位置以及中梁支座焊缝位置的最大 Mises 应力也随之增大, 因此, 可以通过限制车辆经过模数式伸缩缝时的车速来控制其最大应力.

(4)水平与竖向轮载共同作用下伸缩缝上的 Mises 应力结果明显比单方向轮载作用结果大, 在伸缩缝的强度分析中, 有必要同时考虑水平与竖向轮载.

(5)当水平轮载取值较大, 即按国内设计规范的水平轮载取值时, 伸缩缝中梁支座焊缝容易发生强度破坏, 而取国外较小的水平轮载时, 则相对安全. 因此水平轮载的取值对伸缩缝结构的强度分析有较大的影响, 确定符合工程实际的水平轮载是下一步研究值得关注的重点.

### 参考文献:

- [1] Lima J M, Brito J D. Inspection survey of 150 expansion joints in road bridges[J]. Engineering Structures, 2009, 31(5):1077-1084.
- [2] Lima J M, Brito J D. Management system for expansion joints of road bridges[J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2010, 6(6):703-714.
- [3] Guizani L, Bonnell W, Chaallal O. Fatigue testing and performance of welded single-support bar modular bridge joints[J]. Journal of Bridge Engineering, 2014, 20(5): 1-13.
- [4] 杨文科. 大型模数式桥梁伸缩缝的设计[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2013(3):165-167.
- [5] Mascio P D, Loprencipe G, Moretti L, et al. Bridge expansion joint in road transition curve: Effects assessment on heavy vehicles[J]. Applied Sciences, 2017, 7(6):599.
- [6] 贺志勇, 王野, 阳初. 模数式桥梁伸缩缝疲劳寿命的分析[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2016, 44(4): 91-100.
- [7] 梁爱军. 模数式伸缩缝疲劳寿命评估及其更换施工分析[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2011(4):236-239; 247.
- [8] 孙正峰, 王少华, 吴昊, 等. 模数式桥梁伸缩缝水平向

- 动力学响应分析[J]. 公路工程, 2014, 39(3):25-28.
- [9] Coelho B Z, Vervuurt A H J M, Peelen W H A, et al. Dynamics of modular expansion joints: The Martinus Nijhoff Bridge[J]. Engineering Structures, 2013, 48:144-154.
- [10] Ding Y, Zhang W, Au F T K. Effect of dynamic impact at modular bridge expansion joints on bridge design[J]. Engineering Structures, 2016, 127:645-662.
- [11] Stamatiopoulos G N. Fatigue life of the bolted yoke connection in single support beam (SSB) modular bridge expansion joints[J]. International Journal of Steel Structures, 2017, 17(2):723-738.
- [12] 吴昊, 王少华, 李冰, 等. 模数式桥梁伸缩缝固有频率及结构参数灵敏度分析[J]. 公路交通科技, 2014(3): 90-95.
- [13] 中华人民共和国交通部. 公路桥涵设计通用规范(JTJ D60-2015)[M]. 北京: 人民交通出版社, 2015:27-28.
- [14] Steenbergen M J M M. Dynamic response of expansion joints to traffic loading[J]. Engineering Structures, 2004, 26(12):1677-1690.
- [15] 别辽耶夫 H M. 材料力学[M]. 3版. 上海: 商务印书馆, 1955:358-361.
- [16] 匡震邦. 材料的力学行为[M]. 北京: 高等教育出版社, 1998:207-218.

## Computation of dynamic strength of modular bridge expansion joint and analysis of influencing factors

ZOU Yu-ying<sup>1</sup>, LÜ Jun-ping<sup>2</sup>, DING Yong<sup>1\*</sup>, YU Dan-bo<sup>1</sup>, LÜ Jian-hua<sup>3</sup>

( 1.Faculty of Architectural, Civil and Environmental Engineering, Ningbo University, Ningbo 315211, China;

2.Zhejiang Linjin Expressway Co. Ltd., Hangzhou 310000, China;

3.Ningbo Roaby Technology Industrial Group Co. Ltd., Ningbo 315800, China )

**Abstract:** To analyze the damage mechanism of bridge expansion joint under the impact load of vehicles, a finite element model is established for the modular expansion joint commonly used in bridge engineering. The method for calculating the dynamic response under the impact load of the wheel as well as the analysis method of structural pulse strength under asymmetrical cyclic load are proposed. The dynamic strength of the typical RBM160 bridge expansion joint is calculated, and the influencing factors are analyzed. The results show that: (1) The maximum dynamic stress lies at the middle of the center beam and the weld between the center beam and the transverse beam. Such calculation result is consistent with the common damage positions of the expansion joint in the actual projects; (2) The maximum stress of the structure under the combined effect of horizontal and vertical wheel loads is significantly greater than that of the vertical wheel load, indicating that the horizontal wheel load has a great influence on the damage of the expansion joint; however, there is a difference between the domestic and foreign specifications regarding the value of the horizontal wheel load, and the maximum stress of the expansion joint obtained from this difference is great; (3) The maximum stress of the expansion joint increases with the increase of the vehicle speed; as such, by limiting the vehicle speed, the maximum stress of the modular expansion joint can be controlled and the safety of the structure can be ensured; (4) The weld between the center beam and the transverse beam is the weakest part of the structure of the expansion joint, the maximum stress of this part is related to the fullness of the weld, and it can be reduced by optimizing the fullness of the weld to improve the structural safety.

**Key words:** modular bridge expansion joint; horizontal wheel load; impact load; finite element; dynamic strength analysis

(责任编辑 史小丽)