

## 基于车-桥耦合方法的曲线桥疲劳寿命研究

乔博<sup>1</sup>, 王子俊<sup>1</sup>, 严战友<sup>2\*</sup>, 李少奇<sup>2</sup>, 崔永昌<sup>2</sup>

(1. 石家庄铁道大学 土木工程学院, 河北 石家庄 050043; 2. 石家庄铁道大学 交通运输学院, 河北 石家庄 050043)

**摘要:** 为了评估混凝土曲线桥梁在多工况影响下的疲劳性能, 建立车辆和桥梁两个子系统的振动方程。利用模型接触点的位移协调条件和力学平衡条件建立车-桥耦合振动方程, 利用有限元模型模态分析, 将一阶频率、二阶频率、耦合模型计算出的跨中挠度位移与实测数据进行对比, 校验模型可靠性, 考虑温度、车辆行驶速度、桥面不平顺等工况, 基于有限元分析软件 Ansys 进行了车辆荷载作用下混凝土曲线桥动力响应分析, 确定了模型疲劳危险点, 并获得不同工况下的等效应力数据。根据雨流计数法对应力数据进行统计处理, 基于断裂力学理论确定了曲线桥梁主要构件初始裂纹长度、断裂类型、临界裂纹长度、混凝土曲线桥梁裂纹扩展寿命计算方法。研究提出了以疲劳分析为目标的车桥耦合振动响应分析方法、曲线桥梁疲劳剩余使用寿命评估方法, 解决了不同工况对疲劳剩余使用寿命的影响等问题。结果表明: 裂纹扩展呈现初期缓慢、后期加速的指数型增长特征; 车辆行驶位置和温度梯度对疲劳寿命影响显著, 而桥面不平顺等级变化影响相对较小。

**关键词:** 曲线桥; 车-桥耦合; 疲劳剩余使用寿命; 桥面不平顺

**中图分类号:** U416

**文献标识码:** A

## Research on Fatigue Life of Curved Bridges Based on Vehicle Bridge Coupling Method

QIAO Bo<sup>1</sup>, WANG Zijun<sup>1</sup>, YAN Zhanyou<sup>2\*</sup>, LI Shaoqi<sup>2</sup>, CUI Yongchang<sup>2</sup>

(1. College of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang, Hebei 050043, China;

2. School of Traffic and Transportation, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang, Hebei 050043, China)

**Abstract:** To evaluate the fatigue performance of concrete curved bridges under the influence of multiple working conditions, vibration equations for the vehicle and bridge subsystems are established. The coupling of the vehicle and bridge vibration equations was established by using the displacement coordination conditions and mechanical equilibrium conditions at the contact points of the model. The modal analysis of the finite element model was used to compare the first-order frequencies, second-order frequencies, and the mid-span deflection displacements calculated by the coupling model with the measured data, to verify the reliability of the model. Considering temperature, vehicle speed, bridge surface irregularity and other working conditions, the dynamic response analysis of the concrete curved bridge under vehicle load was carried out based on the finite element analysis software ANSYS, and the fatigue hazard points of the model were determined, and the equivalent stress data under different working conditions were obtained. The stress data were statistically processed using the rainflow counting method, and the initial crack length, crack type, critical crack length, and calculation method for the crack propagation life of the concrete curved bridge based on the fracture mechanics theory were determined. The study solved the problems of the vehicle-bridge coupled vibration response analysis method for fa-

收稿日期: 2024-02-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(12072205)

第一作者: 乔博(2000—), 男, 河北石家庄人, 硕士研究生, 从事车-桥耦合动力响应方面的研究。

\* 通信作者: 严战友(1972—), 男, 河北唐山人, 博士, 副教授, 从事车-桥、车-路动力学系统理论研究。

tigue analysis, the fatigue remaining service life assessment method for curved bridges, and the influence of different working conditions on the fatigue remaining service life. The results show that the crack propagation presents an exponential growth characteristic of initial slow and later accelerated; the vehicle driving position and temperature gradient have a significant impact on the fatigue life, while the change in bridge surface irregularity level has a relatively smaller impact.

**Key words:** curved bridge; vehicle-bridge coupling; fatigue residual life; bridge deck irregularity

近年来,公路和铁路交通网的快速发展促进了曲线桥梁的建设<sup>[1]</sup>。在实际使用过程中,桥梁构件常会承受交变荷载的作用,导致构件疲劳损伤<sup>[2]</sup>,这种损伤是桥梁故障和倒塌的主要原因之一。通过评估桥梁的疲劳剩余寿命,可以对预防性维修和维护工作加以优化,避免事故的发生,并降低维修成本。

桥梁的疲劳问题一直是国内外研究学者关注的重点领域<sup>[3]</sup>。围绕桥梁在服役过程中的疲劳问题,研究者们进行了广泛而深入的研究<sup>[4-7]</sup>。倪向贵等<sup>[8]</sup>指出疲劳裂纹扩展遵循 Paris 公式规律,与传统的应力疲劳  $S-N$  曲线有着密切的联系,该研究分析了疲劳裂纹扩展寿命的一般过程,为深入理解疲劳裂纹扩展的内在机制以及预测、防止疲劳裂纹的扩展提供重要的理论依据。Rocha 等<sup>[9-10]</sup>提出了一种基于线弹性断裂力学理论的疲劳寿命测定方法。Wang 等<sup>[11]</sup>认为钢筋混凝土桥梁的疲劳寿命主要受其受力主钢筋控制,基于  $S-N$  曲线和断裂力学机理,结合现场监测数据预测了桥梁疲劳寿命。李慧乐等<sup>[12]</sup>提出了一种评估钢桥的疲劳损伤和预测剩余使用寿命的方法,该方法基于车-桥耦合动力分析,利用  $S-N$  曲线法进行疲劳损伤评估和剩余使用寿命预测,为工程实践提供了重要的理论依据。尽管车-桥耦合振动分析研究不断发展<sup>[13-15]</sup>,但现有研究中桥梁模型多被简化,缺乏疲劳关键节点动力响应分析。此外,疲劳分析过程较少考虑桥面不平顺、温度、钢筋锈蚀等实际因素的影响,疲劳评估结果仍需进一步完善。

为更加准确地预测桥梁的疲劳性能,本文基于 Ansys 软件建立车辆和桥梁模型,通过 APDL 编程引入多种工况,实现车-桥耦合,进而研究了以疲劳分析为目标的车-桥耦合振动响应分析方法。在此基础上,结合断裂力学理论,本研究提出了以疲劳分析为目标的车-桥耦合振动响应分析方法和曲线桥梁疲劳剩余使用寿命评估方法,进而探讨了桥面不平顺对模型疲劳剩余寿命的影响规律。

## 1 车-桥耦合振动分析模型

车辆模型、桥梁模型、外部激励模拟以及数值计算方法是车-桥耦合动力分析系统的基础。车辆模型需要考虑车辆的重量、转动惯量和自由度等特性,桥梁模型则需要反映桥梁的结构形式和材料特性等。车-桥相互作用方程中的位移协调条件是指车辆和桥梁在接触点处的位移相同。力的平衡是指车辆和桥梁之间的相互作用力需要达到平衡状态。这些条件的应用是精准模拟车-桥耦合振动行为的关键,从而实现对桥梁疲劳性能和寿命的精准预测。

### 1.1 车-桥耦合方程

#### 1.1.1 桥梁的结构振动微分方程

桥梁的结构振动微分方程见式(1)。

$$[M_b]\{\ddot{Z}\} + [C_b]\{\dot{Z}\} + [K_b]\{Z\} = \{F_b\} \quad (1)$$

式中,  $\{Z\}$  为桥梁节点的位移矩阵;  $[M_b]$  为桥梁的总质量矩阵;  $[C_b]$  为桥梁阻尼矩阵;  $[K_b]$  为桥梁刚度矩阵;  $\{F_b\}$  为桥梁结构荷载矩阵。

总质量矩阵表征桥梁模型的质量分布情况,刚度矩阵描述了模型的刚度特性。在构建桥梁有限元模型时,通过详细模拟桥梁的几何特征、材料特征和边界条件等,可以得到桥梁模型的总质量矩阵和刚度矩阵。

#### 1.1.2 四自由度半车模型振动方程

为减少计算量的同时体现车辆系统的振动特点,本文选择四自由度半车模型,其示意图见图1。图中,  $m_{hb}$  为车身质量, kg;  $I_{hb}$  为俯仰转动惯量,  $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ ;  $Z_1$ 、 $Z_2$  为前、后车轮的竖向位移, m;  $Z_{hb}$  为车身质心的垂向位移, m;  $\theta_{hb}$  为车身俯仰角, rad;  $m_1$ 、 $m_2$  为前、后悬架与轮胎的质量之和, kg;  $C_1$ 、 $C_2$  为前、后车轮与车身之间的阻尼系数, N/m;  $K_1$ 、 $K_2$  为前、后车轮与车身间的弹簧刚度, N/m;  $Z_3$ 、 $Z_4$  为前、后车轮与桥面接触处位移, m;  $K_3$ 、 $K_4$  为前、后车轮与桥面之间的等效刚度, N/m;  $C_3$ 、 $C_4$  为前、后车轮与桥面之间的阻尼系数, N/m;  $L_1$ 、 $L_2$  为前、后轮到车辆重心的距离, m; 整车长度为  $L = L_1 + L_2$ ;  $Z_{01}$ 、 $Z_{02}$  为前端、后端车身垂向位移, m。  $Z_{hb}$ 、 $\theta_{hb}$ 、

$Z_{01}$ 、 $Z_{02}$  之间的关系见式(2)。

$$Z_{01} = Z_1 + L_1 \theta_{hb}, Z_{02} = Z_1 - L_2 \theta_{hb} \quad (2)$$

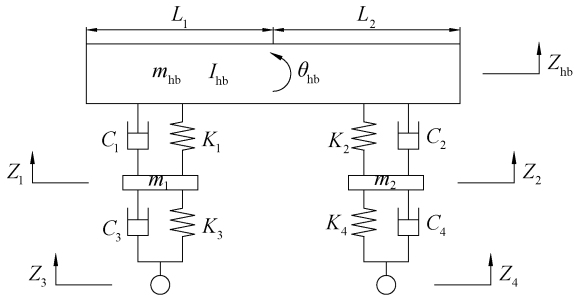


图1 半车模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the semi-truck model

四自由度半车模型将车体、车轴和车轮视为刚体,并通过弹簧和阻尼器连接各刚体。据此建立车辆振动方程,并从中获取车辆模型的总质量矩阵和刚度矩阵。

平面车辆模型的广义坐标使用车辆的4个独立自由度表示,即  $Z_1$ 、 $Z_2$ 、 $Z_{hb}$ 、 $\theta_{hb}$ ,依据达朗贝尔原理建立车辆振动方程。车辆位移矩阵、车辆质心位置竖向位移方程、车辆俯仰运动方程、车辆质心位置竖向位移方程、弹簧-阻尼系统竖向运动方程见式(4)~式(7),整理可得车辆矩阵,见式(8)。

$$Z = [Z_1 \quad Z_2 \quad Z_{hb} \quad \theta_{hb}]^T \quad (3)$$

$$m_{hb} \ddot{Z}_{hb} = C_1(\ddot{Z}_1 - \dot{Z}_{01}) + K_1(Z_1 - Z_{01}) + C_2(\dot{Z}_2 - \dot{Z}_{02}) + K_2(Z_2 - Z_{02}) \quad (4)$$

$$I_{hb} \ddot{\theta}_{hb} = L_2 [C_2(\dot{Z}_2 - \dot{Z}_{02}) + K_2(Z_2 - Z_{02})] - L_1 [C_1(\dot{Z}_1 - \dot{Z}_{01}) + K_1(Z_1 - Z_{01})] \quad (5)$$

$$m_1 \ddot{Z}_1 = K_3(Z_3 - Z_1) + C_3(\dot{Z}_3 - \dot{Z}_1) - [C_1(\dot{Z}_1 - \dot{Z}_{01}) + K_1(Z_1 - Z_{01})] \quad (6)$$

$$m_2 \ddot{Z}_2 = K_4(Z_4 - Z_2) + C_4(\dot{Z}_4 - \dot{Z}_2) - [C_2(\dot{Z}_2 - \dot{Z}_{02}) + K_2(Z_2 - Z_{02})] \quad (7)$$

$$[M_v] \{\ddot{Z}\} + [C_v] \{\dot{Z}\} + [K_v] \{Z\} = \{F_v^i\} \quad (8)$$

式中,  $\{F_v^i\}$  为车辆振动过程中各自由度的惯性荷载列向量;  $[M_v]$  为车辆质量矩阵;  $[C_v]$  为车辆阻尼矩阵;  $[K_v]$  为车辆速度矩阵;  $\{Z\}$  为车辆各自由度位移矩阵。

### 1.1.3 车-桥耦合方程的建立

将车辆和桥梁简化为2个独立的子系统,车-桥相互作用动力方程是基于车轮和桥梁接触点处位移协调条件和力的平衡条件建立起来的。在位移关系中,假定车轮始终与桥面贴合,车轮的竖向位移值为车轮接触位置的桥面竖向位移值和桥面不平顺数值的叠加。车辆和桥梁耦合振动通过接

触点力的平衡实现,即式(1)和式(8)中的右边项  $\{F_b\}$ 、 $\{F_v^i\}$  是大小相等、方向相反的力。车-桥耦合方程见式(9)~(10)。

$$\Delta_i(t) = y_i(t) - z_i(t) - r_i \quad (9)$$

$$F_b(t) = -F_v(t) = -k_i \Delta_i(t) - c_i \dot{\Delta}_i(t) \quad (10)$$

式中,  $\Delta_i(t)$  为第  $i$  个车轮  $t$  时刻相对于桥面的垂向位移,  $m$ ;  $y_i(t)$  为桥面  $t$  时刻与第  $i$  个车轮接触位置的位移,  $m$ ;  $z_i(t)$  为第  $i$  个车轮  $t$  时刻的竖向位移,  $m$ ;  $r_i$  为桥面  $t$  时刻与第  $i$  个车轮接触点外部激励模拟得到的桥面不平顺值,  $m$ ;  $k_i$  为第  $i$  个车轮与桥面之间的等效刚度,  $N/m$ ;  $c_i$  为第  $i$  个车轮与桥面之间的阻尼系数,  $N/m$ 。

## 1.2 桥面不平顺

桥面不平顺对车-桥耦合振动分析的影响不可忽略,桥面不平顺的存在会加快桥梁疲劳损伤的积累,影响桥梁剩余使用寿命。根据文献[16],桥面不平顺功率谱密度可用式(11)表示。通过三角级数叠加法模拟桥面不平顺,评估其对车-桥耦合振动分析的影响,桥面不平顺数值  $\gamma(x)$  可由式(12)计算得到。

$$G_d(n) = G_d(n_c) \left( \frac{n}{n_c} \right)^{-\beta} \quad (11)$$

式中,  $n$  为空间频率,  $m^{-1}$ ;  $n_c$  为参考空间频率,  $n_c = 0.1 m^{-1}$ ;  $G_d(n)$  为位移功率谱密度,描述了不平顺的“能量”在空间频率上的分布,可以同时考虑不同波长的桥面起伏对车辆的影响,  $m^2/m^{-1}$ ;  $G_d(n_c)$  为桥面不平顺系数,  $m^2/m^{-1}$ ;  $\beta$  为频率指数,取 1.94。

$$\left\{ \begin{aligned} \gamma(x) &= \sum_{k=1}^N \alpha_k \cos(2\pi n_k x + \theta_k) \\ \alpha_k^2 &= 2G_d(n_k) \Delta n \\ n_k &= n_l + \left(k - \frac{1}{2}\right) \Delta n \\ \Delta n &= \frac{(n_u - n_l)}{N} \end{aligned} \right. \quad (12)$$

式中,  $x$  为车轮与桥端的距离,  $m$ ;  $\alpha_k$  为函数的幅值,由功率谱密度函数确定,  $m$ ;  $n_k$  为第  $k$  个空间频率的取值,  $m^{-1}$ ;  $\Delta n$  为频率间隔,  $m^{-1}$ ;  $n_u$ 、 $n_l$  决定  $n_k$  的范围,  $m^{-1}$ ;  $\theta_k$  为介于  $0 \sim 2\pi$  的随机相位角,可由随机函数生成,  $rad$ ;  $N$  为随机产生的不平顺节点个数,  $pcs$ 。桥面等级划分依据  $G_d(n_c)$  的控制范围分为 A、B、C、D、E5 个等级,对应的桥面不平顺系数分别取  $0.24 \times 10^{-6}$ 、 $0.62 \times 10^{-6}$ 、 $2.5 \times 10^{-6}$ 、 $10 \times 10^{-6}$ 、 $16 \times 10^{-6} m^2/m^{-1}$ 。

## 2 基于断裂力学的疲劳寿命评估方法

### 2.1 初始裂纹长度假定

根据文献[10],钢筋混凝土桥梁的疲劳寿命可以由受力主筋的疲劳寿命确定。为进行疲劳寿命计算,假定圆柱形钢筋表面出现一条呈半圆形的初始裂纹,其方向垂直于钢筋轴线,寿命计算参考 Paris 公式。该简化模型并未完全反映实际情况,实际上钢筋并非完全平滑,且具有肋部结构,裂缝大多发生在肋根部的应力集中区域。此外,在稳定裂纹扩展之前存在裂纹萌生阶段,考虑到其在裂纹扩展过程中所占比例较小,因此,本研究未予考虑。

初始裂纹的长度可通过无损检测法或假定法确定,由于钢筋混凝土桥梁结构不规则且钢筋位于桥梁内部,不易观测,通常采用合理假设确定一个虚拟初始裂纹,用于计算疲劳剩余寿命。根据文献[2-3]的结果,初始裂纹长度按式(13)计算。

$$a_0 = 0.25 \left( \frac{\Delta K_{th}}{\Delta \sigma} \right)^2 \quad (13)$$

式中,  $a_0$  为初始裂纹长度, m;  $\Delta \sigma$  为应力幅最大值,  $N/m^2$ ;  $\Delta K_{th}$  为钢筋裂纹扩展临界值,  $Pa \cdot m^{1/2}$ 。

### 2.2 临界裂纹长度确定

根据断裂力学原理,基于不同的断裂准则可计算出构件裂纹在某一载荷下的临界裂纹长度。临界裂纹长度取决于材料的韧性和载荷大小。当构件中的裂纹长度超过临界裂纹长度时,钢筋可能发生失稳断裂。钢筋断裂的主要形式为脆性断裂和韧性断裂,对应的临界裂纹长度不同,钢筋的临界裂纹长度取两者中的较小值。

$$a_{fr} = \min\{a_{cr}, a_y\} \quad (14)$$

式中,  $a_{fr}$  为临界裂纹长度, m;  $a_{cr}$  为钢筋发生脆性断裂时的裂纹长度, m;  $a_y$  为钢筋发生韧性断裂时的裂纹长度, m。

钢筋裂纹从初始状态开始扩展的示意图见图2。图中,  $r$  为钢筋半径, mm。

#### 2.2.1 脆性断裂临界裂纹长度

在车辆荷载作用下,当主受力钢筋裂纹长度扩展到临界裂纹长度时,钢筋混凝土构件发生断裂损坏。根据线弹性断裂力学的  $K$  准则,若应力强度因子  $K$  超过材料的平面应变断裂韧性  $K_{IC}$ , 钢筋混凝土构件有发生脆性断裂的可能。临界裂纹长度可以由应力强度因子的定义推导出来。

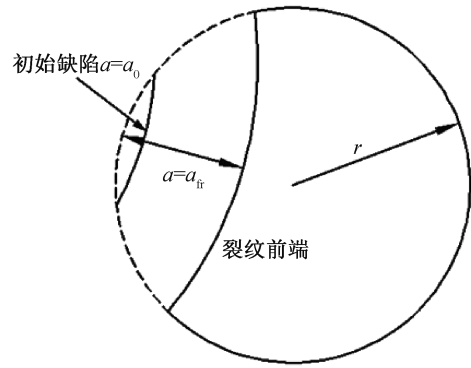


图2 裂纹扩展示意图

Fig. 2 Schematic diagram of crack expansion

$$a_{cr} = \frac{1}{\pi} \left( \frac{K_{IC}}{\sigma_{max} \cdot Y} \right)^2 \quad (15)$$

式中,  $Y$  为几何修正因子;  $\sigma_{max}$  为应力循环中的最大值,  $N/m^2$ ; 根据文献[10-11, 17], 取  $Y = Y(a_{cr})$ ,  $K = K_{IC}$ , 即可求得  $a_{cr}$ , 几何修正因子  $Y$  可用式(16)表示。

$$Y = \frac{1.84}{\pi} \left\{ \frac{\tan\left(\frac{\pi a}{4r}\right)}{\frac{\pi a}{4r}} \right\}^{0.5} \left\{ 0.752 + 2.02 \left( \frac{a}{2r} \right) + 0.37 \left[ 1 - \sin\left(\frac{\pi a}{4r}\right) \right]^3 \right\} / \cos\left(\frac{\pi a}{4r}\right) \quad (16)$$

#### 2.2.2 韧性断裂临界裂纹长度

当钢筋剩余截面等效应力  $\sigma$  达到钢筋屈服应力  $f_y$  时, 钢筋发生屈服破坏。剩余截面可近似为圆形截面, 此时对应的临界裂纹长度可按式(17)计算。

$$A(a_y) = A_0 \left( 1 - \frac{\sigma_{max}}{f_y} \right) \quad (17)$$

式中,  $A_0$  为钢筋原横截面面积,  $m^2$ ;  $A(a_y)$  为发生疲劳裂纹时钢筋截面减少的面积,  $m^2$ 。

### 2.3 裂纹扩展计算

疲劳寿命是指初始裂纹扩展到临界裂纹长度所经历的载荷循环次数。估算疲劳裂纹扩展寿命时, 假设裂纹扩展只受初始裂纹影响, 忽略其他因素。在此前提下, 裂纹扩展速率与应力强度因子的关系用 Paris 公式<sup>[18]</sup> 来表示, 见式(18)。

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \quad (18)$$

式中,  $C$ 、 $m$  为材料参数, 由试验数据拟合得到;  $K$  为应力强度因子, 表示混凝土构件裂纹尖端处的应力场分布特点,  $Pa \cdot m^{1/2}$ ;  $\Delta K$  为应力强度因子的

差值,即一个应力循环过程中  $K$  的最大值与最小值的差值;混凝土构件裂纹的  $K$  值与裂纹几何形状、施加应力等满足应力强度因子的定义式。

对 Paris 公式两边进行积分,裂纹由  $a_0$  扩展到  $a_{fr}$  的应力循环次数  $N_e$  可以表示为

$$N_e = \int_{a_0}^{a_{fr}} dN = \int_{a_0}^{a_{fr}} \frac{1}{C(\Delta K)^m} da = \int_{a_0}^{a_{fr}} \frac{1}{C \cdot Y^m \cdot \Delta \sigma^m \cdot \pi^{m/2} \cdot a^{m/2}} da \quad (19)$$

在按照式(18)计算疲劳裂纹扩展寿命时,几何修正因子  $Y$  是随裂纹长度变化的函数,积分求解困难。因此,可采用循环计算的方法,将问题分段处理。对于每一段应力幅  $\Delta \sigma_i$ ,取应力强度因子  $\Delta K$  为常数,进行分段积分,再将各段结果相加,即得到总的疲劳裂纹扩展寿命。

### 3 实例研究

#### 3.1 工程背景

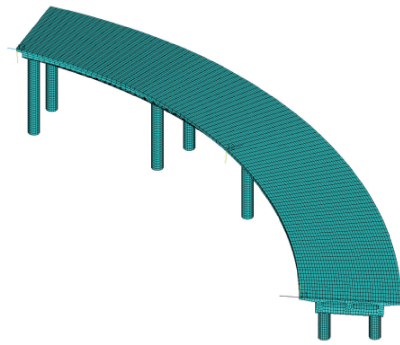
本文以某四跨连续曲线箱梁桥为研究对象,桥梁全长 68 m,孔跨布置为(3×15+17) m,平均曲率半径为 50 m,桥身结构为现浇钢筋混凝土直腹式单箱双室连续箱梁,桥墩为双柱式墩,桥台为挡土式桥台。桩基为嵌岩桩,机械钻孔成孔有 1.2、1.4、1.6 m 三种桩径。

#### 3.2 模型概况

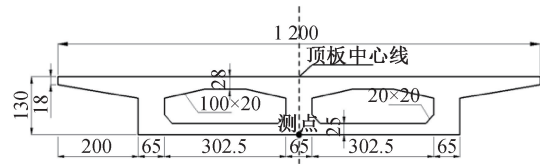
本研究采用 APDL 命令流,利用 SOLID186 实体单元建立桥梁有限元模型。模型包含 36 182 个单元,723 640 个节点。表 1 列出了桥梁主体及桥墩等构件材料参数。主梁一端可自由转动,另一端约束其全部自由度。桥梁模型示意图如图 3 所示,桥墩与主梁的连接通过耦合其接触面节点的自由度来实现。桥墩部分节点约束全部自由度,模拟桥墩的边界条件。桥梁为四跨曲线梁,为测量不同位置的等效应力,选取每跨跨中底板中心线位置为测点,其横截面、支座约束及测点布置见图 3(b)(c)。

表 1 混凝土及沥青材料参数

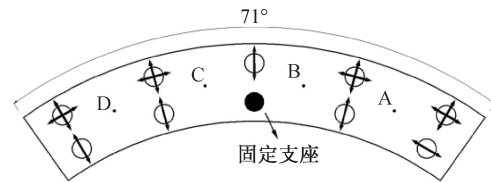
构件	材料	弹性模量 $E/\text{MPa}$	密度 $\rho$ / ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	泊松比 $\mu$
桥墩	C40 混凝土	$3.25 \times 10^4$	2 400	0.20
桥身	C50 混凝土	$3.45 \times 10^4$	2 420	0.20
桥面铺装层	沥青	$1.60 \times 10^4$	2 350	0.35



(a) 桥梁模型



(b) 梁体横截面(单位: cm)



(c) 支座约束及测点布置

图 3 桥梁模型示意图

Fig. 3 Diagram of the bridge model

#### 3.3 模型有效性验证

为验证桥梁有限元模型的准确性,利用 Ansys 软件对曲线桥模型进行模态分析,并将获得的一阶、二阶频率与实测值进行对比,见表 2。为验证车-桥耦合方法的可靠度,选取动载工况(车体质量 42 t,沿桥面中心线行驶、无温度梯度作用及无桥面不平顺),车辆分别以 5、10、15 km/h 的速度过桥,将模型第三跨跨中测点 C 的竖向挠度计算值与实测值进行对比,见表 3。

表 2 桥梁频率实测值与计算值对比

Tab. 2 Comparison of measured and simulated values of bridge frequency

阶数	实测值/Hz	计算值/Hz	相对误差%
一阶	10.00	9.432 1	5.6
二阶	12.36	13.357 0	8.1

表 3 竖向挠度实测值与计算值对比

Tab. 3 Comparison between measured and calculated values of vertical deflection

测量位置	速度/ ( $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ )	实测值/ mm	计算值/ mm	相对误差/ %
第三跨跨中	5	0.18	0.189 0	5.0
	10	0.18	0.187 7	4.2
	15	0.17	0.187 7	4.2

建立的有限元模型是对实际桥梁结构的简化,模型的接触、约束条件无法完全等同于实际情况,且网格尺寸及材料属性参数的设置存在误差。表 2、表 3 结果表明,桥梁模型一阶、二阶频率与实测频率的相对误差均在 10% 以内,车辆动载工况下,桥梁第三跨跨中竖向位移计算值与实测值的相对误差均在 5% 以内。相对误差在允许范围内,该模型可满足车-桥耦合振动响应分析的精度要求。

### 3.4 考虑桥面不平顺的车-桥耦合动应力分析

#### 3.4.1 疲劳危险点的确立

疲劳损伤通常发生在应力集中区域,桥梁的剩余使用寿命取决于其局部构件的疲劳情况。为确认疲劳分析的关键构件,需进行整体的动力响应分析,确定整体应力较大的位置,这些位置即为疲劳危险点。选取如下工况进行车-桥耦合动力响应分析:车辆载重 42 t、速度 36 km/h,无桥面不平顺,车辆沿桥梁截面中心线行驶。提取每跨跨中底板中心线位置测点的等效应力时程曲线,见图 4。选取等效应力峰值最大的测点作为疲劳危险点。

比较各跨的等效应力峰值,发现桥梁第一跨跨中(测点 A)的响应最为明显,该位置更易发生疲劳破坏,因此,本文选取测点 A 作为疲劳寿命分析的关键点。

#### 3.4.2 不同工况测点 A 动应力响应

不同工况作用下疲劳分析关键点 A 等效应力时程曲线趋势均相同,本研究只选取桥面不平顺工况开展行车-桥耦合振动分析<sup>[7]</sup>,获取该点等效应力时程曲线,见图 5。可以看出,无桥面不平顺工况下,车辆在驶向关键点 A 的过程中,等效应力

值逐渐增大。当车辆经过第一跨跨中位置时,等效应力值先减小再增大。在该过程中出现等效应力峰值,车身驶离关键点 A 后等效应力逐渐减小。在峰值处改变桥面不平顺等级,发现各工况下等效应力时程曲线的整体趋势基本一致,随着不平顺等级的提高,车辆对桥梁的冲击越来越大。

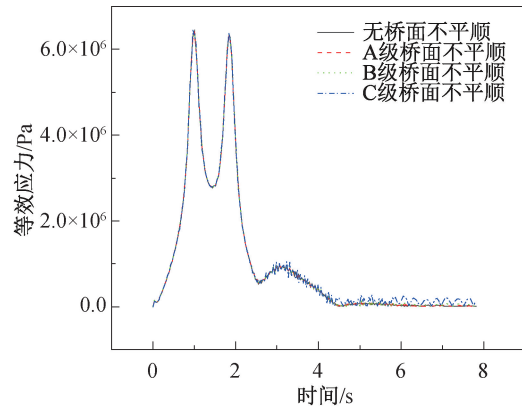


图 5 改变桥面不平顺等级等效应力时程图

Fig. 5 Time-history diagram of equivalent stress for changing the unevenness level of the pavement

#### 3.4.3 应力幅及循环次数

采用雨流计数法对测点的等效应力数据进行统计处理,得到以应力幅直方图表示的应力谱。以车辆载重 42 t、速度 36 km/h、A 级桥面不平顺、车辆沿桥梁截面中心线行驶的工况下的等效应力结果为例,获得单次车辆荷载作用下应力幅值与循环次数关系,如图 6 所示。可以看出,桥梁在常规车辆荷载下以低应力幅、高循环次数的疲劳载荷为主;高应力幅(如峰值应力)循环次数较少,对应车辆轴重或动态冲击引起的极端载荷单次损伤贡献较大,这可能是桥面不平顺或车辆振动耦合效应引起的。

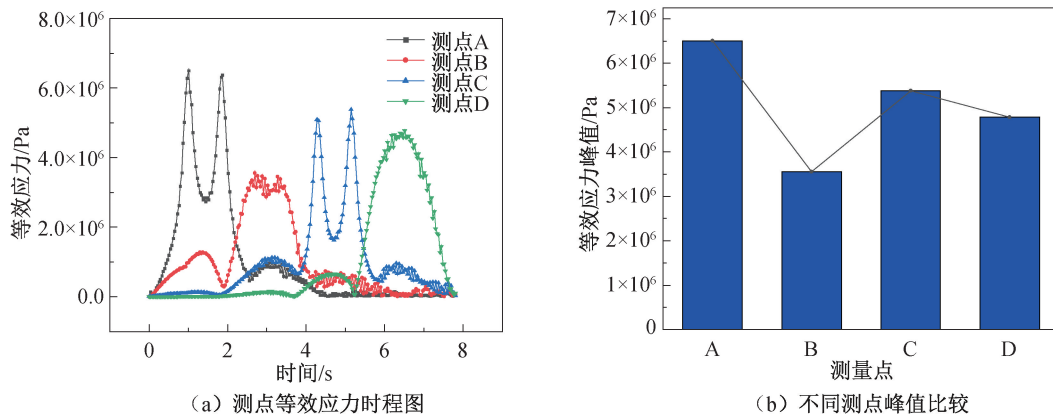


图 4 测点等效应力峰值比较

Fig. 4 Comparison of peak equivalent stresses at measurement points

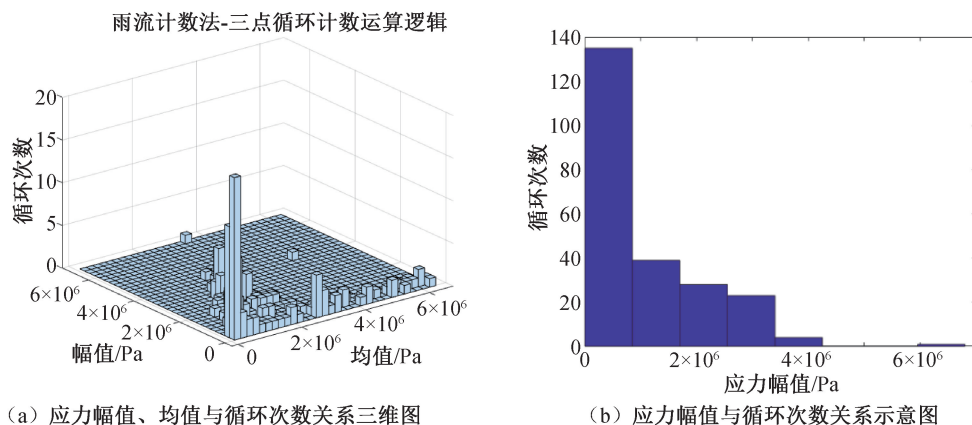


图6 雨流计数法统计结果图

Fig. 6 Statistical result of the rainfall accumulation method

### 3.5 疲劳剩余使用寿命

类比文献[19]数据,桥梁受力主筋为Ⅱ级钢筋,半径 $r=11$  mm,屈服强度 $f_y=335$  MPa,桥梁钢筋计算时材料参数取 $C=2.03 \times 10^{-13}$ , $m=4$ ,裂纹初始长度为1 mm。根据式(15),裂纹临界扩展长度为5.532 mm。使用MATLAB编写程序计算裂纹从初始长度 $a_0$ 扩展到临界长度 $a_r$ 的循环次数。

不同工况作用下裂纹扩展变化图见图7。断裂力学的疲劳寿命评估结果表明,裂纹长度与循环次数之间呈现指数型关系:在不同工况的车辆荷载作用下,裂纹扩展均呈现初期增长速率较慢,随循环次数增加而逐渐加速的特征;当裂纹长度接近临界长度时,裂纹快速扩展并导致钢筋发生破坏。

## 4 结论

本研究通过对曲线桥梁有限元模型分析,验证了车-桥耦合动力分析方法的可靠性。本文以疲

劳扩展寿命评估为目标,提取等效应力数据,并使用雨流计数法对应力数据进行统计处理。在此基础上,使用线弹性断裂力学理论对曲线桥梁钢筋疲劳寿命进行评估,并得到以下结论:

1)不同桥面条件下车辆行驶测点应力响应无明显差别,单次行驶造成的疲劳损伤差别较小;车辆行驶位置或者行驶速度不同使得测点等效应力响应有着较为明显的差异,单次循环过程中应力峰值及循环次数改变较为明显,车辆行驶位置或者车辆行驶速度的改变对疲劳寿命影响较大,车辆行驶速度越大,裂纹越容易失效;车辆行驶位置越靠近沿曲线桥曲率半径内侧,裂纹越容易失效。

2)研究使用的断裂力学方法适用于线弹性材料裂纹扩展阶段,如果用于疲劳裂纹全阶段寿命分析,结果会偏于安全,有必要在裂纹萌生阶段选取更加合适的疲劳寿命研究理论。此外,在疲劳寿命评估中,外界环境如湿度、钢筋锈蚀对改变钢筋材料性能的影响也应加以深入研究。

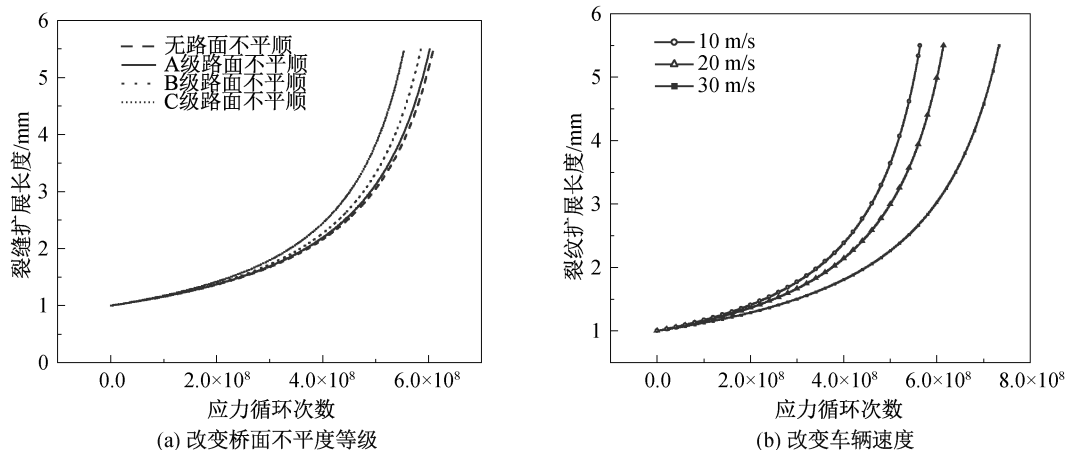


图7 不同工况作用下裂纹扩展曲线变化图

Fig. 7 Changes in crack propagation curves under different working conditions

## 参考文献:

- [1] 赵跃宇, 康厚军, 冯锐, 等. 曲线梁研究进展[J]. 力学进展, 2006, 36(2): 170-186.  
ZHAO Y Y, KANG H J, FENG R, et al. Advances of research on curved beams[J]. Progress in Mechanics, 2006, 36(2): 170-186.
- [2] 张劲泉, 宋紫薇, 韩冰, 等. 车辆荷载作用下公路混凝土桥梁疲劳问题研究进展[J]. 土木工程学报, 2022, 55(12): 65-79.  
ZHANG J Q, SONG Z W, HAN B, et al. Research progress on fatigue of highway concrete bridges under vehicle loading[J]. Transactions of the Chinese Society of Civil Engineering, 2022, 55(12): 65-79.
- [3] ALAVI A H, HASNI H, JIAO P, et al. Fatigue cracking detection in steel bridge girders through a self-powered sensing concept[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2017, 128: 19-38.
- [4] 张宁, 余凯, 崔闯, 等. 大跨度桥梁钢桥面板跨尺度疲劳损伤评估方法[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2024, 46(3): 161-170.  
ZHANG N, YU K, CUI C, et al. Multiscale fatigue damage assessment method for orthotropic steel deck of long-span bridges[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2024, 46(3): 161-170.
- [5] 邓露, 毕涛, 何维, 等. 基于疲劳寿命的钢筋混凝土桥梁限载取值分析方法[J]. 中国公路学报, 2017, 30(4): 72-78.  
DENG L, BI T, HE W, et al. Vehicle weight limit analysis method for reinforced concrete bridges based on fatigue life[J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, 30(4): 72-78.
- [6] 杨良, 孙立军. 钢筋混凝土桥梁的钢筋锈蚀与疲劳耦合损伤[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2015, 43(12): 1784-1787.  
YANG L, SUN L J. Damage of steel bar of reinforced concrete bridge by the coupling effect of corrosion and fatigue[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2015, 43(12): 1784-1787.
- [7] ZHANG W, CAI C S. Fatigue reliability assessment for existing bridges considering vehicle speed and road surface conditions[J]. Journal of Bridge Engineering, 2012, 17(3): 443-453.
- [8] 倪向贵, 李新亮, 王秀喜. 疲劳裂纹扩展规律 Paris 公式的一般修正及应用[J]. 压力容器, 2006, 23(12): 8-15+19.  
NI X G, LI X L, WANG X X. General modification and application of the Paris law for fatigue crack propagation[J]. Pressure Vessel, 2006, 23(12): 8-15+19.
- [9] ROCHA M, BRÜHWILER E J P B M, SAFETY, et al. Prediction of fatigue life of reinforced concrete bridges using fracture mechanics[J]. Structural Engineering and Construction Management, 2012, 1: 3755-3761.
- [10] HERWIG A. Reinforced concrete bridges under increased railway traffic loads fatigue behaviour and safety measures[D]. Suisse: École Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2008.
- [11] WANG C, ZHAI M S, DUAN L, et al. Fatigue service life evaluation of existing steel and concrete bridges[J]. Journal of Bridge Engineering, 2015, 11(3): 305-321.
- [12] 李慧乐, 夏禾. 基于车桥耦合随机振动分析的钢桥疲劳可靠度评估[J]. 工程力学, 2017, 34(2): 69-77.  
LI H L, XIA H. Fatigue reliability evaluation of steel bridges based on coupling random vibration analysis of train and bridge[J]. Engineering Mechanics, 2017, 34(2): 69-77.
- [13] 严战友, 靳兆阳, 赵晓林, 等. 移动荷载作用下三跨钢-混组合连续梁桥面铺装动态响应[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2019, 49(6): 1109-1115.  
YAN Z Y, JIN Z Y, ZHAO X L, et al. Dynamic response of bridge deck pavement of three-span steel-concrete composite continuous beam under moving loads[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2019, 49(6): 1109-1115.
- [14] 王贵春, 李武生. 基于车桥耦合振动的车辆舒适性分析[J]. 振动与冲击, 2016, 35(8): 224-230.  
WANG G C, LI W S. Analysis on the vehicle ride comfort based on vehicle-bridge coupled vibration[J]. Journal of Vibration and Shock, 2016, 35(8): 224-230.
- [15] 陈博宇, 高非凡, 李烁威, 等. 车桥耦合振动对曲线钢混组合梁桥的影响[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2024, 41(6): 79-86.  
CHEN B Y, GAO F F, LI S W, et al. Influence of vehicle-bridge coupled vibrations on curved steel-concrete composite girder bridges[J]. Journal of Hebei University of Engineering (Natural Science Edition), 2024, 41(6): 79-86.
- [16] 全国机械振动与冲击标准化技术委员会. 机械振动道路路面谱测量数据报告: GB/T 7031—2005 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2005.  
Mechanical Vibration Shock and Condition Monitoring. Mechanical vibration—road surface profiles—reporting of measured data: GB/T 7031—2005 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2005.
- [17] HONGYE G, HUIYAN X, KAIQIANG L. Study of a new assessment approach of fatigue life based sequential law for existing railway bridges[J]. China Civil Engi-

neering Journal, 2015, 48(9):76-84.

- [18] 王剑, 文国华. 基于 DM-LEFM 理论的混凝土桥梁受力主筋疲劳全寿命分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2020, 17(10):2597-2602.

WANG J, WEN G H. Life-cycle fatigue analysis of main reinforcements of the concrete bridge based on the DM-LEFM theory[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2020, 17(10): 2597-2602.

(上接第 53 页)

- [15] LI Z, ZHAO Z, SHI H, et al. Experimental study on PVA-MgO composite improvement of sandy soil [J]. Materials, 2022, 15(16): 5609.

- [16] 文武, 庄心善, 赵奕杨, 等. PVA(聚乙烯醇)改良膨胀土强度性能试验研究[J]. 湖北工业大学学报, 2023, 38(1): 90-93.

WEN W, ZHUANG X S, ZHAO Y Y, et al. Experimental research on strength performance of PVA (polyvinyl alcohol) improved expansive soil[J]. Journal of Hubei University of Technology, 2023, 38(1): 90-93.

- [17] 李中尧, 李文伟, 史海平, 等. 聚乙烯醇改良高原黏土水稳定性实验研究[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(3): 1205-1211.

LI Z Y, LI W W, SHI H P, et al. Experimental study on water stability of plateau clay improved by polyvinyl alcohol [J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(3): 1205-1211.

- [18] 陈志昊, 刘瑾, 钱卫, 等. 高分子固化剂/纤维改良砂土的抗拉强度试验研究[J]. 工程地质学报, 2019, 27(2): 350-359.

- [19] 白伦华, 朱劲松. 基于损伤-断裂综合法的钢筋混凝土桥梁疲劳寿命分析方法研究[J]. 四川建筑科学研究, 2016, 42(1):50-54.

BAI L H, ZHU J S. Fatigue life prediction method of reinforced concrete bridge based on damage and fracture integration method[J]. Sichuan Building Science, 2016, 42(1): 50-54.

(责任编辑 张爱丽)

CHEN Z H, LIU J, QIAN W, et al. Experimental study on tensile strength of polymer curing agent/fiber modified sand [J]. Journal of Engineering Geology, 2019, 27(2): 350-359.

- [19] CHERDSAK S, SUKSUN H, CHAKKRID Y, et al. Evaluation of polyvinyl alcohol and high calcium fly ash based geopolymer for the improvement of soft Bangkok clay[J]. Transportation Geotechnics, 2021, 27: 100476.

- [20] 力乙鹏, 李婷. 土壤固化剂的固化机理与研究进展[J]. 材料导报, 2020, 34(S2): 1273-1277+1298.

LI Y P, LI T. Stability mechanism and research progress of soil stabilizer[J]. Materials Reports, 2020, 34(S2): 1273-1277+1298.

- [21] 孟立山, 詹秀环, 姚新建. 聚乙烯醇水凝胶的制备及其溶胀性能[J]. 化工技术与开发, 2010, 39(8): 13-14.

MENG L S, ZHAN X H, YAO X J, et al. Preparation of polyethylene(PVA) hydrogel and its properties [J]. Technology & Development of Chemical Industry, 2010, 39(8): 13-14.

(责任编辑 张爱丽)