

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2025.08.020

预制拼装梁桥车致振动剪力键受力特性研究

尹龙龙¹, 李雪峰¹, 束晓宇², 张智越³

(1. 合肥工业大学 土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009; 2. 安徽省城乡规划设计研究院, 安徽 合肥 230051; 3. 中国铁建大桥工程局集团有限公司, 天津 300300)

摘要:文章选用1/4车辆模型,在ANSYS软件中以约束方程法模拟胶接缝并求解桥梁模型,采用全过程迭代法对车桥耦合模型进行求解。以胶接缝腹板测点剪应力和底板测点正应力为指标,研究不同参数对预制节段拼装梁桥剪力键受力的影响。结果表明:剪力键应力的变化幅度及最大值随路面不平整度的增加而增大,随桥梁阻尼比的增大而减小,车辆速度的影响会随车辆和测点位置的改变而改变;车辆驶过测点截面时,测点的剪应力会发生突变;各参数中路面不平整度对剪力键受力影响是最大的。

关键词:车桥耦合振动;预制节段拼装;剪力键;胶接缝;全过程迭代法

中图分类号:U441.3

文献标志码:A

文章编号:1003-5060(2025)08-1139-07

Study on force characteristics of shear keys in prefabricated segmental assembled girder bridges with vehicle-bridge coupling vibration

YIN Longlong¹, LI Xuefeng¹, SHU Xiaoyu², ZHANG Zhiyue³

(1. School of Civil and Hydraulic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. Anhui Urban and Rural Planning and Design Institute, Hefei 230051, China; 3. China Railway Construction Bridge Engineering Bureau Group Co., Ltd., Tianjin 300300, China)

Abstract: In this paper, 1/4 vehicle model was selected. The epoxy joints were simulated using the constraint equation method and the bridge model was solved in ANSYS. The inter-system iteration method was used to solve the vehicle-bridge coupling model. The effects of different parameters on the stress of shear keys of prefabricated segmental assembled girder bridge were studied using the shear stress of web plate and the normal stress of bottom plate as indexes. The results show that the variation amplitude and maximum value of shear key stress increase with the increase of pavement unevenness and decrease with the increase of bridge damping ratio. The influence of vehicle speed changes with the change of vehicle position and stress measuring point position. When the vehicle passes the section of the measuring point, the shear stress of the measuring point will suddenly change. The influence of pavement unevenness on the stress of shear keys is the largest.

Key words: vehicle-bridge coupling vibration; prefabricated segmental assembly; shear key; epoxy joint; inter-system iteration method

0 引言

胶接缝在预制节段拼装梁桥中起到传力和限位的作用,是结构受力较为薄弱的环节,其受力性能和工作情况的可靠度与整个桥梁的安全和适用

性能密切相关。对预制节段拼装梁桥胶接缝剪力键受力研究主要有试验法和数值模拟法。文献[1]开展剪力键的剪切破坏试验,键齿形式采用平接缝、单键齿和多键齿,接缝采用干接缝和胶接缝,得到干接缝构件的抗剪强度小于胶接缝,胶结

收稿日期:2023-05-06;修回日期:2023-05-23

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51878234)

作者简介:尹龙龙(1999—),男,安徽阜阳人,合肥工业大学硕士生;

李雪峰(1980—),男,安徽合肥人,博士,合肥工业大学副教授,硕士生导师,通信作者,E-mail:hfutlxf@163.com.

缝试件的承载能力与整体试件相近;文献[2]对不同的接缝类型、接缝正应力大小以及环氧树脂胶的厚度进行试验研究,结果表明胶接缝和干接缝的破坏都属于脆性破坏,试件的抗剪能力随着正应力的提高而提高;文献[3]对接缝中剪力键的受力性能开展试验研究,得到五键齿试件比三键齿试件抗剪性能更佳,应力分布更均匀;文献[4]通过数值模拟的方法研究接缝直剪承载力与混凝土强度的关系,提出胶接缝和干接缝直剪承载力的计算公式;文献[5]利用实验对单键齿胶接缝混凝土梁的疲劳和抗剪性能进行研究,得出常温固化型的环氧树脂胶接缝比低温固化型的抗剪能力高 28%且接缝和钢束性能受疲劳荷载的影响较小;文献[6]提出干接缝以及胶接缝键齿的抗剪强度计算公式;文献[7]利用理论分析和数值模拟的方法建立键齿的破坏力学模型,通过接缝的抗剪性能试验得到对于有键齿的试件,其抗剪承载能力高于无键齿试件;文献[8]研究表明胶接缝箱梁在受力性能上与整体梁类似,胶接缝箱梁的开裂荷载以及极限的抗弯荷载均高于干接缝箱梁。

目前针对振动响应下预制拼装桥梁剪力键受力问题研究较少,本文研究预制节段拼装桥梁在车桥耦合振动下胶接缝剪力键受力问题,而学者对于车桥耦合振动的研究也多集中于整体桥梁,预制拼装桥梁车桥耦合振动鲜有研究。对于接缝和剪力键受力的研究也多是建立局部模型进行静力研究。本文建立了完整、精细化的桥梁模型,对预制节段拼装梁桥在车桥耦合振动下胶接缝剪力键受力问题进行研究。

1 车桥耦合振动基本理论

1.1 车辆模型

选用 1/4 车辆模型,根据达朗贝尔原理推导可得车体的振动平衡方程为:

$$m_v \ddot{y}_v + c_v (\dot{y}_v - \dot{y}_w) + k_v (y_v - y_w) = 0 \quad (1)$$

其中: m_v 为车体质量; k_v 为车体和悬架车轮系统之间弹簧的刚度; c_v 为车体和悬架车轮系统之间弹簧的阻尼系数; y_v 为车体竖向位移; y_w 为悬架车轮系统竖向位移。

悬架车轮系统的振动平衡方程为:

$$m_w \ddot{y}_w + c_w (\dot{y}_w - \dot{y}_c) + k_w (y_w - y_c) - c_v (\dot{y}_v - \dot{y}_w) - k_v (y_v - y_w) = 0 \quad (2)$$

其中: m_w 为车轮和悬架总质量; k_w 为悬架车轮系统弹簧的刚度; c_w 为悬架车轮系统弹簧的阻尼系数; y_c 为轮胎和桥面接触点竖向位移。

将方程(1)、方程(2)写为矩阵形式:

$$\mathbf{M}_v \ddot{\mathbf{Y}}_v + \mathbf{C}_v \dot{\mathbf{Y}}_v + \mathbf{K}_v \mathbf{Y}_v = \mathbf{F}_v \quad (3)$$

$$\text{其中: } \mathbf{M}_v = \begin{bmatrix} m_v & 0 \\ 0 & m_w \end{bmatrix}; \mathbf{C}_v = \begin{bmatrix} c_v & -c_v \\ -c_v & c_v + c_w \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{K}_v = \begin{bmatrix} k_v & -k_v \\ -k_v & k_v + k_w \end{bmatrix}; \mathbf{Y}_v = \begin{bmatrix} y_v \\ y_w \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{F}_v = \begin{bmatrix} 0 \\ c_w y_c + k_w y_c \end{bmatrix}。$$

1.2 桥梁模型建立

以三跨(3×30 m)体外预应力等截面单箱单室预制节段拼装箱梁桥为研究对象,节段之间使用胶接缝连接,每跨有 8 条接缝,每个胶接缝的剪力键布置情况相同。每个接缝共有 35 个剪力键,其中顶板剪力键 16 个,腹板剪力键 14 个,底板剪力键 5 个,沿箱梁中心线对称分布。顶板和底板剪力键沿水平方向布置,与顶底板平行,腹板剪力键与水平方向有一定夹角,与腹板外边缘垂直。每个剪力键的高度为 40 mm。剪力键的布置和尺寸如图 1、图 2 所示。

ANSYS 软件建立桥梁模型,节段箱梁为 C50 混凝土,使用 SOLID186 单元模拟;转向块、横梁为 C50 混凝土,使用 SOLID185 单元模拟;胶接缝符合 ASTM32B 标准,使用约束方程法模拟^[9];体外预应力筋为无黏结镀锌钢绞线,使用 LINK180 单元进行模拟。

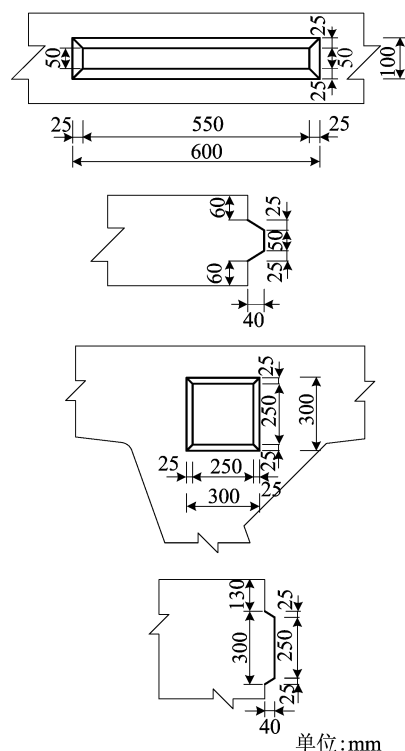


图 1 顶板剪力键尺寸图

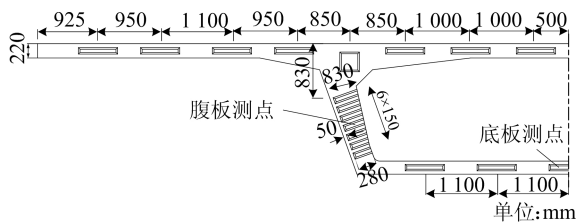


图 5 接缝剪力键布置及腹板底板测点选取

2.1 剪力键对截面应力分布的影响

剪力键的存在会改变接缝处传力机制,影响截面的应力分布。选取工况为:车速 30 m/s,路面平整度 B 级,桥梁阻尼比 0.030。车辆行至中跨跨中时,观察 1 号截面测点剪应力和 2 号截面测点正应力在截面的分布,如图 6、图 7 所示。

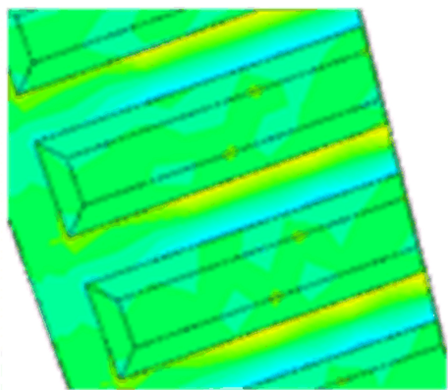


图 6 1 号截面腹板局部

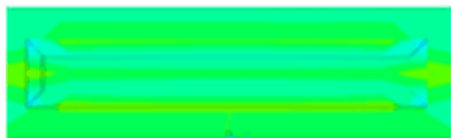


图 7 2 号截面底板局部

由图 6、图 7 可知,由于剪力键的存在,剪应力和正应力在截面的分布是不均匀的,1 号截面的剪应力在腹板剪力键的根部有较明显的应力集中,2 号截面的正应力在底板剪力键的角点以及长棱线处有较明显的应力集中,由于这些地方有截面的突变。

1 号截面腹板测点剪应力静动力分析如图 8 所示。2 号截面底板测点正应力静动力分析如图 9 所示。由图 8、图 9 可知,静力分析的结果和动力分析的结果在变化趋势上总体保持一致,动力分析的结果会在静力分析的基础上高低起伏变化,由于车桥力以车辆自身重力为基准上下起伏。与静力分析结果相比,动力分析会产生更大的应力最大值,应力的变化幅度也更大,可知车桥耦合振

动对于剪力键的受力是不利的。

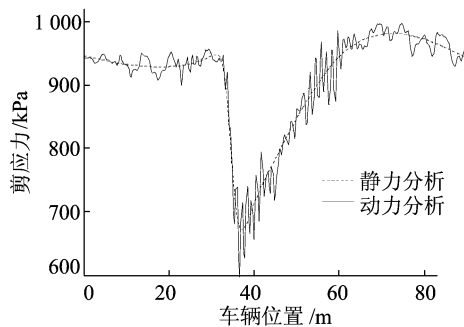


图 8 1 号截面腹板测点剪应力静动力分析

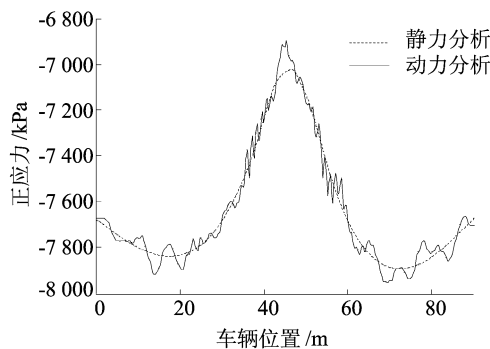
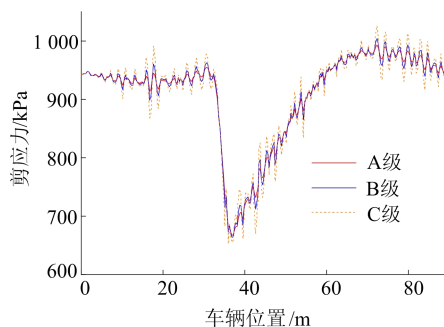


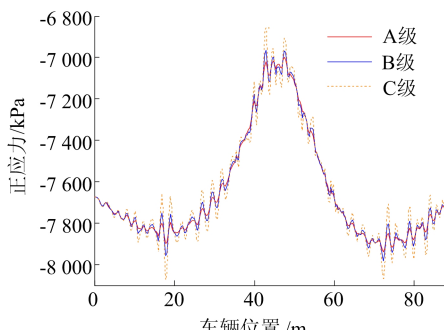
图 9 2 号截面底板测点正应力静动力分析

2.2 路面平整度对剪力键受力的影响

车辆速度选用 10 m/s,桥梁阻尼比选用 0.03,使用 A 级、B 级、C 级路面 3 种工况来研究路面平整等级对剪力键受力的影响,结果如图 10 所示。



(a) 1号截面腹板测点剪应力



(b) 2号截面底板测点正应力

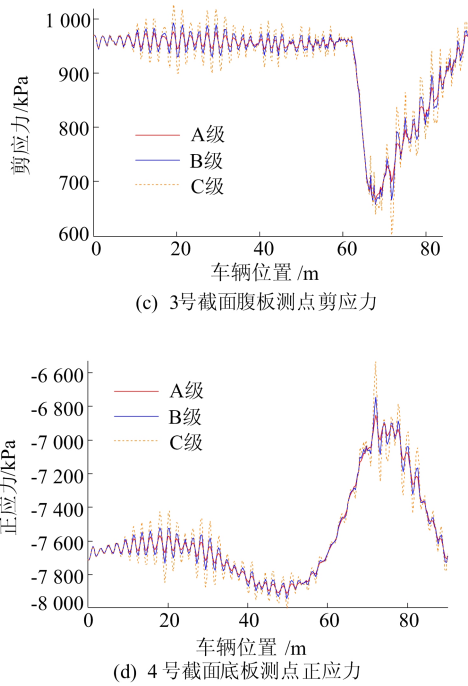


图 10 路面平整度对各截面测点应力的影响

由图 10 可知,1 号截面和 3 号截面测点的剪应力有一段较陡的图形,这是由于车辆经过测点截面时引起剪力突变造成的。随着路面起伏的变大,各个截面测点的应力变化幅度都有增大趋势,且应力起伏与下降的位置基本都保持一致,这是由于在本算例中路面起伏的增大只会增加车桥力变化量的大小而不会改变其频率。

不同路面平整度条件下,各截面测点应力的最值以及最大值与最小值的差值见表 1 所列。

表 1 不同路面平整度下各截面测点应力最值和差值

不平 整度	统计值	1 号截面剪 应力/kPa	2 号截面正 应力/kPa	3 号截面剪 应力/kPa	4 号截面正 应力/kPa
A 级	最大值	992	-7 939	976	-7 912
	最小值	667	-6 999	665	-6 851
	差值	325	940	311	1 061
B 级	最大值	1 003	-7 982	993	-7 941
	最小值	663	-6 964	656	-6 745
	差值	340	1 018	337	1 196
C 级	最大值	1 026	-8 073	1 027	-7 997
	最小值	652	-6 848	600	-6 533
	差值	374	1 225	427	1 464

由表 1 可知,随着路面平整度由 A 级增加到 C 级,各个截面测点应力的最大值和差值都有所增大。1 号截面测点剪应力最大值由 992 kPa 增加到 1 026 kPa,增大了 3.4%,差值由 325 kPa 增加到 374 kPa,增大了 15.1%;2 号截面测点正应力最大值由 -7 939 kPa 增加到 -8 073 kPa,

增大了 1.7%,差值由 940 kPa 增加到 1 225 kPa,增大了 30.3%;3 号截面测点剪应力最大值增大了 5.2%,差值增大了 37.3%;4 号截面测点正应力最大值增大了 1.1%,差值增大了 38.0%。可见,随着路面平整度增加,各测点应力的变化幅度、最大值和差值均会随之增大,且差值增大幅度远大于最大值增大幅度,应力波动范围加剧。因此在桥梁施工过程中,应注意路面平整度的控制。

2.3 车辆速度对剪力键受力的影响

选择路面平整度为 B 级,桥梁阻尼比为 0.03,使用 10、20、30 m/s 3 种工况研究车速对剪力键受力的影响,结果如图 11 所示。

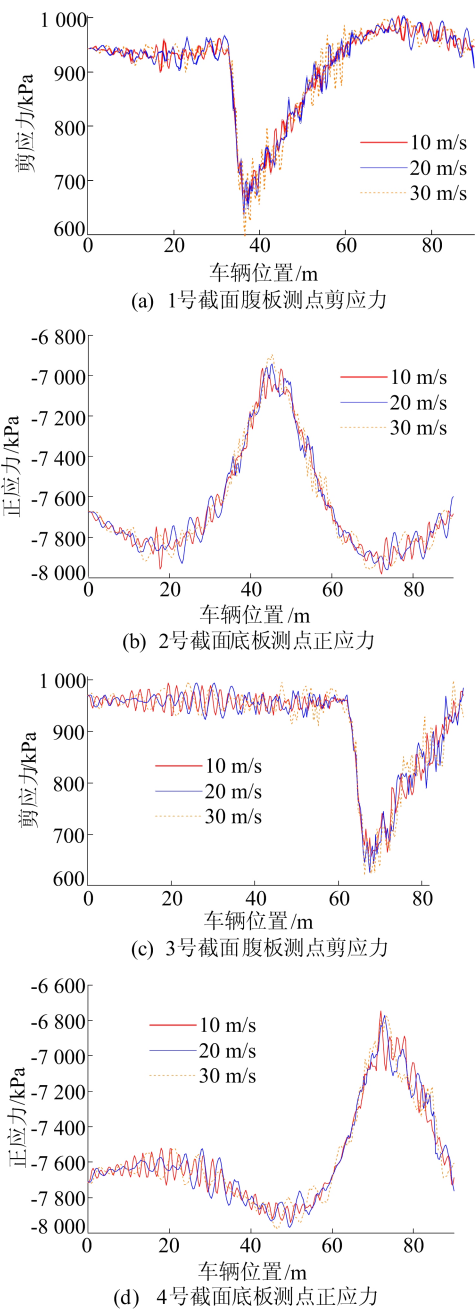


图 11 车辆速度对各截面测点应力的影响

由图 11a 可知,对于 1 号截面测点,随着车速的增大,测点剪应力变化的幅度会逐渐增大。当车辆行驶至截面检测点所在跨(即中跨)时,幅度增加较为明显;当车辆不在检测点所在跨时,幅度增大不明显,在局部甚至有减小的现象。

由图 11b 可知:对于 2 号截面测点,车速由 10 m/s 增加到 20 m/s 时,测点的正应力变化幅度几乎没有改变;在由 20 m/s 增大到 30 m/s 时,变化幅度在车辆行驶至检测跨(中跨)时有增大现象,行驶至非检测跨时,增大幅度不明显。

由图 11c 可知:对于 3 号截面测点,当车辆行驶至 45~90 m 即桥梁后半段时,随着车速的增大,应力变化幅度有增大的趋势;但车辆在 5~20 m、车速由 10 m/s 增至 20 m/s 时,出现应力变化幅度明显减小的现象。

由图 11d 可知:对于 4 号截面测点,正应力变化幅度随车速变化不大。但车辆在 5~20 m、车速由 10 m/s 增至 20 m/s 时,以及车辆在 70~80 m、车速由 20 m/s 增大至 30 m/s 时,再次出现应力变化幅度明显减小的现象。

不同车辆速度条件下,各截面测点应力的最大值以及最大值与最小值的差值见表 2 所列。

由表 2 可知:1 号截面测点剪应力的最大值变化不大,最小值随着车速增大而减小,导致剪应力的差值不断增大;2 号截面测点正应力最大值随车速增大而减小,最小值也会随着车速增大而减小,正应力的差值随车速增大而增大;3 号截面测点剪应力最大值变化不大,最小值随车速增大减小,导致剪应力差值变大;4 号截面测点正应力最大值和最小值都随车速增大而变大,正应力的差值有小幅增大。出现这种现象的原因是:车辆速度的增加不仅会增大车桥力的变化幅度,也会增加车桥力的频率,产生 2 个变量,导致车辆速度与应力的关系不再是简单的单调关系。

表 2 不同车速下各截面测点应力最值和差值

车速/ (m/s)	统计值	1 号截面剪 应力/kPa	2 号截面正 应力/kPa	3 号截面剪 应力/kPa	4 号截面正 应力/kPa
10	最大值	1 003	-7 982	993	-7 941
	最小值	663	-6 964	656	-6 745
	差值	340	1 018	337	1 196
20	最大值	1 003	-7 961	994	-7 967
	最小值	632	-6 943	626	-6 771
	差值	371	1 018	368	1 196
30	最大值	997	-7 957	998	-7 975
	最小值	596	-6 893	621	-6 775
	差值	401	1 064	377	1 200

从以上分析可知,虽然车速对应力的影响不是单调的,随着车辆位置以及截面测点位置的变化而变化,但应力最大值与最小值的差值随车速增加的。因此在桥梁运营过程中对车速进行一定限制对预制节段拼装桥梁剪力键的受力是有利的。

2.4 桥梁阻尼比对剪力键受力的影响

车速选用 10 m/s,路面平整度为 B 级,使用桥梁阻尼比为 0.03、0.05、0.08 的 3 种工况研究桥梁阻尼对剪力键受力的影响,将不同的质量矩阵系数和刚度矩阵系数代入 ANSYS 软件,完成迭代计算后输出相应位置的应力随时间变化的数据,结果如图 12 所示。

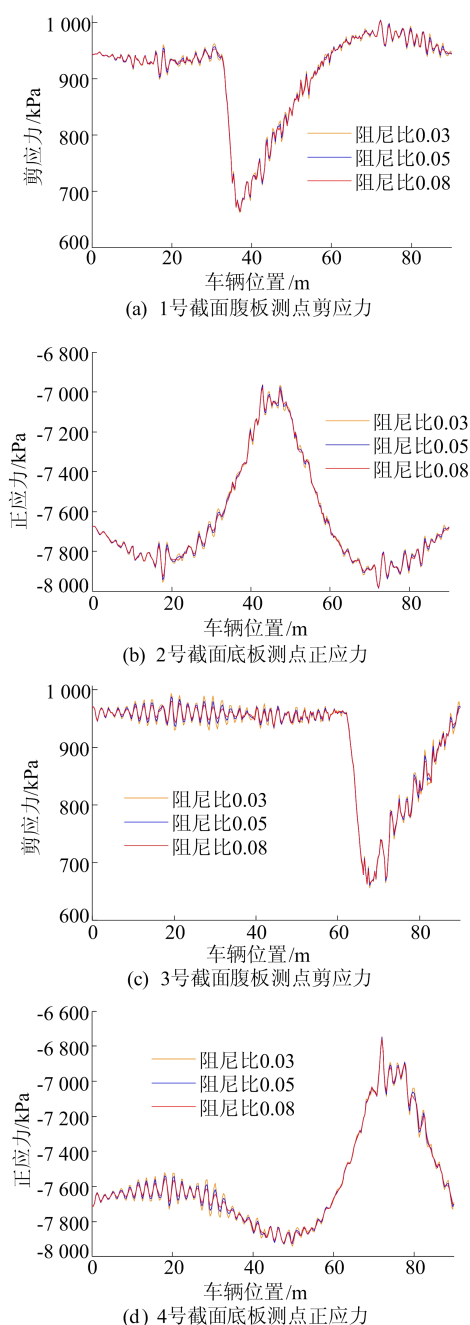


图 12 桥梁阻尼比对各截面测点应力的影响

不同桥梁阻尼比条件下,各截面测点应力的最值以及最大值和最小值的差值见表 3 所列。

表 3 不同桥梁阻尼比下各截面测点应力最值和差值

阻尼比	统计值	1号截面	2号截面	3号截面	4号截面
		剪应力/kPa	正应力/kPa	剪应力/kPa	正应力/kPa
0.03	最大值	1 003	-7 982	993	-7 941
	最小值	663	-6 964	656	-6 745
	差值	340	1 018	337	1 196
0.05	最大值	1 004	-7 987	987	-7 926
	最小值	665	-6 968	661	-6 750
	差值	339	1 019	326	1 176
0.08	最大值	1 003	-7 984	980	-7 921
	最小值	666	-6 979	663	-6 759
	差值	337	1 005	317	1 162

由图 12 可知,随着阻尼比的增大,各截面测点的应力变化幅度都有减小的趋势,且应力上升和下降的位置基本保持一致。由表 3 可知,随着桥梁阻尼比由 0.03 增加到 0.08,各个截面应力的最大值变化很小,差值有减小的趋势。可见,桥梁阻尼可以减小剪力键应力的变化幅度以及最大值与最小值的差值,对于最大值的影响非常小。在实际工程中,可以采用人为增大桥梁阻尼的方法来减小预制节段拼装桥梁剪力键的应力变化。

3 结 论

本文以一座三跨体外预应力等截面单箱单室预制节段拼装箱梁桥为研究对象,采用全过程迭代法,基于 ANSYS 分析研究了车致振动下,路面不平整度、车辆速度和桥梁阻尼比对剪力键受力的影响,得到如下结论:

1) 4 个截面测点的应力最大值、变化幅度、最大值与最小值之间的差值均随着路面不平整度的增大而增大;变化幅度和差值会随着桥梁阻尼比增大而减小,最大值受阻尼比的影响较小。

2) 车辆速度对于截面测点应力影响不是单调的,会随着车辆位置及应力测点的变化而变化,除个别工况外,应力的差值随着车速增加而增加。

3) 截面测点应力最大值和最小值差值变化幅度大于最大值变化幅度,说明在研究剪力键应力时,不仅应该关注最大值,也要关注应力变化产生的影响;车辆驶过截面测点时,测点剪应力会发生突变;在控制路面不平整度函数相位差相同的

情况下,不同路面不平整度引起的截面测点应力变化的趋势是基本保持一致;车桥力的频率对于截面测点的应力也有较大影响,且不是单调的。

4) 在路面不平整度、车辆速度以及桥梁阻尼比中,路面不平整度对剪力键受力造成的影响最大,桥梁阻尼比造成的影响最小;车桥耦合振动对剪力键受力的影响是不利的。在施工过程中,应加强对路面不平整度的控制。

[参 考 文 献]

- [1] KOSEKI K, BREEN J E. Exploratory study of shear strength of joints for precast segmental bridges, FHWA/TX-84/32+248-1 [R]. [S. l. : s. n.], 1983: 1-91.
- [2] BUYUKOZTURK O, BAKHOUM M M, BEATTIE S M. Shear behavior of joints in precast concrete segmental bridges [J]. Journal of Structural Engineering, 1990, 116(12): 3380-3401.
- [3] 汪双炎. 悬臂拼装节段梁剪力键模型试验研究[J]. 铁道建筑, 1997(3): 23-28.
- [4] ROMBACH G. Precast segmental box girder bridges with external prestressing-design and construction[J]. Segmental Bridges, 2002, 24(2): 1-15.
- [5] ISSA M A, ABDALLA H A. Structural behavior of single key joints in precast concrete segmental bridges[J]. Journal of Bridge Engineering, 2007, 12(3): 315-324.
- [6] JIANG H, YANG L, WEI C, et al. Analysis of mechanical properties of joint structure in external pre-stressing concrete bridges[C]//ICCTP 2010: Interated Transportation Systems. Reston: ASCE, 2010: 3071-3079.
- [7] 王建超. 节段预制拼装混凝土桥梁接缝抗剪性能试验研究[D]. 南京: 东南大学, 2011.
- [8] SAIBABU S, SRINIVAS V, SASMAL S, et al. Performance evaluation of dry and epoxy jointed segmental prestressed box girders under monotonic and cyclic loading[J]. Construction & Building Materials, 2013 38(2): 931-940.
- [9] 王新敏, 李义强, 许宏伟. ANSYS 结构分析单元与应用[M]. 北京: 人民出版社, 2007: 435-450.
- [10] 付仇. 富山赣江特大桥车桥耦合振动响应及冲击系数研究[D]. 南昌: 华东交通大学, 2018.
- [11] 毛旺涛. 大件运输车辆过桥实体车桥耦合振动分析与性能评价研究[D]. 西安: 长安大学, 2020.
- [12] 张楠, 夏禾. 基于全过程迭代的车桥耦合动力系统分析方法[J]. 中国铁道科学, 2013, 34(5): 32-38.

(责任编辑 吴 亮)