

文章编号:1673-9469(2025)04-0057-06

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2025.04.008

## 移动荷载作用下曲线斜拉桥支座动态响应分析

陈博宇<sup>1</sup>,王竞宇<sup>2</sup>,张运波<sup>2\*</sup>

(1.河北建工集团有限公司,河北石家庄 050051;  
2.石家庄铁道大学 土木工程学院,河北石家庄 050043)

**摘要:**针对移动车辆作用下半漂浮体系钢箱梁曲线斜拉桥支座的动态响应问题,以太子城互通式立交主线1号桥右幅为研究对象,基于有限元软件ABAQUS建立该桥模型,采用移动荷载模拟车辆在桥上的行驶过程,设置不同的车速、不同等级的桥面不平度以及偏载工况,探究移动车辆对该塔梁交接处支座应力的影响,为相关桥型的设计和维护提供参考意见。研究表明,外侧支座受力略大于内侧支座。鉴于桥梁的曲率半径较大,移动车辆的车速对支座应力影响较小,而桥面不平度和车辆偏载对支座应力影响较大。同时,内外偏载工况下,支座的应力响应峰值几乎无差别,该桥并不易出现主梁侧翻现象。

**关键词:**半漂浮体系曲线斜拉桥;钢箱梁;支座应力;移动荷载;动态响应

中图分类号:U448

文献标识码:A

## Dynamic Response Analysis of Curved Cable-stayed Bridge Bearings Under Moving Loads

CHEN Boyu<sup>1</sup>, WANG Jingyu<sup>2</sup>, ZHANG Yunbo<sup>2\*</sup>

(1. Hebei Construction Engineering Group Co., Ltd., Shijiazhuang, Hebei 050051, China;  
2. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang, Hebei 050043, China)

**Abstract:** In order to solve the problem of dynamic response of the support of the curved cable-stayed bridge of semi-floating steel box girder under the action of moving vehicles, the right width of the No. 1 bridge of the main line of Taizicheng interchange was taken as the research object, the bridge model was established based on the finite element software ABAQUS, the moving load was used to simulate the driving process of the vehicle on the bridge, different vehicle speeds, different levels of bridge deck unevenness and eccentric load conditions were set, and the influence of moving vehicles on the bearing stress at the junction of the tower girder was explored, so as to provide reference opinions for the design and maintenance of related bridge types. The results show that the stress on the outer support is slightly greater than that on the inner support. In view of the large radius of curvature of the bridge, the speed of the moving vehicle has little influence on the bearing stress, while the unevenness of the bridge deck and the eccentric load of the vehicle have a great influence on the bearing stress. At the same time, under the condition of internal and external eccentric load, the peak stress response of the support is almost unchanged, and the bridge is not prone to the phenomenon of the main girder rollover.

**Key words:** curved cable-stayed bridge with semi-floating system; steel box girder; bearing stresses; moving loads; dynamic responses

收稿日期:2023-10-28

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51778377)

第一作者:陈博宇(2000—),男,河北固安人,硕士研究生,从事大跨度桥梁施工控制及结构理论方面的研究。

\* 通信作者:张运波(1971—),男,河北馆陶人,博士,副教授,从事大跨度桥梁施工控制及结构理论方面的研究。

随着交通运输事业的快速发展,近年来,高速公路、城市立交和高架道路日益增多,以往道路设计服从桥梁设计理念的情况逐渐改变为一般桥梁设计服从道路要求的理念<sup>[1]</sup>。因此,由于道路线形的控制要求,新型桥的建造需求日益增多,曲线斜拉桥就是其中之一。本文工程背景所选用的桥梁结构为半漂浮体系,其在弯扭耦合作用下具有如下受力特点<sup>[2]</sup>:支座仅设置竖向支撑,其横向受力靠斜拉索承担;曲线斜拉桥的外侧挠度较内侧挠度大,若出现超载现象,外侧梁体发生扭转,由此带来的外侧支座应力过大,内侧支座应力甚至可能出现负应力现象。

相较于一般直线桥,曲线桥更易受弯扭耦合影响<sup>[3-4]</sup>。随着时代的发展,曲线桥在公路上的应用也愈加广泛,车辆荷载对公路曲线桥影响的相关研究也随之开展。刘星等<sup>[5]</sup>探究了载重、车速和路面不平顺等因素对曲线梁桥振动响应的影响,得出车辆行驶速度对跨中的横向位移及支座的支反力有较大影响的结论。展艳凯<sup>[6]</sup>通过研究得出曲线梁桥竖向位移和支座反力响应受路面等级的改变影响很大,且曲线梁桥两端的支座更有可能首先发生滑动。陈水生等<sup>[7-9]</sup>分析了车辆荷载作用下曲率半径对曲线连续箱梁桥的影响,并继续探究了车辆的初速度、制动力上升时间、车辆制动位置、桥面平整度等参数及多车荷载对曲线梁桥的影响。Nazzal<sup>[10]</sup>通过研究得出车辆在桥上的突然制动和车辆行驶速度对平面曲线梁的动力响应均有很大的影响。Yang等<sup>[11]</sup>通过解析法研究了曲线梁在单个和多个等间距的竖向和水平移动荷载叠加作用下的响应,并通过谐波叠加法建立了共振条件。Iwase等<sup>[12]</sup>利用模态重叠技术研究分析了在移动荷载作用下单跨和多跨非均匀截面曲线梁的动力特性,给出了几个数值解。Ding<sup>[13]</sup>使用移动谐波荷载模拟车辆荷载,并以此为基础研究了曲线桥的动力响应。陈博宇等<sup>[14]</sup>针对曲线桥上部结构在车辆作用下弯曲变形与扭转变形耦合作用的现象,对曲线桥跨中位移与应力在车辆荷载作用下的响应情况进行了分析研究。

本文以钢箱梁曲线斜拉桥为研究对象,采用移动荷载<sup>[15]</sup>模拟真实车辆在桥面上行驶过程,进而对钢箱梁曲线斜拉桥塔梁交接处支座在移动荷载作用下的动力学行为特性进行研究,以确保结构安全性与适用性,为同类桥型设计及维护提供参考。

## 1 桥梁模型建立

### 1.1 工程背景

本文以太子城互通式立交主线1号桥右幅为研究对象。该桥上部结构为双塔双索面曲线斜拉桥,下部结构中,桥墩采用矩形花瓶墩、盖梁式花瓶墩,桥台采用肋板式桥台、桩柱式桥台,墩台基础均采用钻孔灌注桩。该桥梁景观图如图1所示。



图1 太子城互通式立交主线1号桥景观图

Fig. 1 Landscape view of Line 1 of Taizicheng Bridge

主线1号桥采用分离式路基设计,右幅桥梁中线桩号为K93+454.323,全长495 m,共有4联,跨径布置为(25 m+60 m+120 m+60 m+25 m)+2 m×24 m+3 m×30 m+2 m×30 m,桥宽范围为13~21.738 m,平面位于圆曲线,圆曲线半径 $R=1\ 100$  m,右偏。该桥顶板车道区域板厚为16 mm,根据受力需要设置U肋。U肋厚度为8 mm,高度为280 mm,上口宽为300 mm,下口宽为184 mm,横向标准间距为600 mm。箱梁底板厚16 mm,设置平板肋,板肋厚度16 mm,高度160 mm,标准间距400 mm。中腹板厚度为14 mm,高为1 968 mm;边腹板厚度为30 mm,高为1 000 mm。边、中腹板均设置纵向I型肋,主梁截面如图2所示。桥梁采用半漂浮结构设计,钢索塔由外索塔、内索塔及二者之间的斜杆组成。外索塔外轮廓为椭圆形,其中上、下索塔段由外索塔、内索塔及二者之间的斜杆连接而成,而中索塔段为外索塔、内索塔合为一个整体参与受力。外、内索塔均采用五边形断面,横桥向宽度是变化的,宽度由外、内索塔的椭圆线轮廓线确定。索塔在桥面(桥面设计标高)以上高度为30.66 m,桥面以下高度为22.283 m(含混凝土段),总高度为52.943 m,索塔截面如图3所示<sup>[16]</sup>。

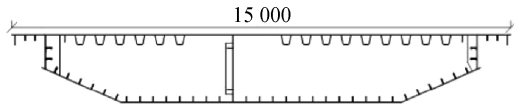


图 2 钢箱梁曲线斜拉桥右幅主梁截面图(单位:mm)

Fig. 2 Cross-sectional view of the right girder of the steel box girder curved cable-stayed bridge (unit:mm)

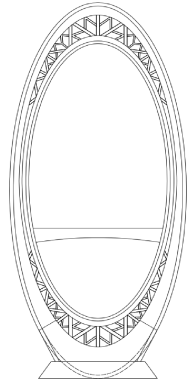


图 3 钢箱梁曲线斜拉桥右幅索塔截面图

Fig. 3 Cross-section of the right cable tower of the curved cable-stayed bridge of the steel box girder

### 1.2 有限元模型的建立

本文基于大型通用有限元软件 ABAQUS,根据太子城互通式立交主线 1 号桥相关图纸及设计规范,建立钢箱梁曲线斜拉桥有限元模型。全桥分为主梁、索塔、斜拉索及承台四部分。ABAQUS 软件包含多种不同类型的单元,在建立有限元模型时要根据结构特点及分析计算的需求选择合理单元<sup>[17]</sup>。钢箱梁曲线斜拉桥有限元模型如图 4 所示,该有限元模型所选用材料的具体参数见表 1。

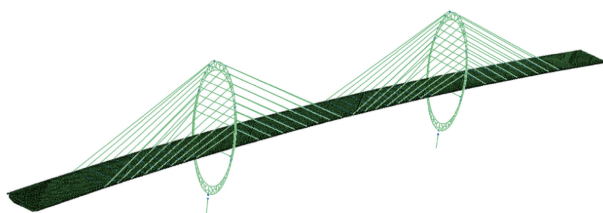


图 4 钢箱梁曲线斜拉桥有限元模型

Fig. 4 Finite element model of curved cable-stayed bridge of steel box girder

作为传递上部结构荷载和满足上部结构位移的重要部件,支座需承受梁体来自温度、车辆荷载、混凝土收缩徐变产生的荷载,并具备良好的活动性能。其布置方式需满足桥梁变形的要求,并且便于安装和维护。在钢箱梁曲线斜拉桥中,采

表 1 模型材料参数表

Tab. 1 Table of model material parameter

材料类型	材料型号	单元类型	弹性模量/MPa	泊松比	材料密度/(kg·m <sup>-3</sup> )
主梁钢材	Q345qE	shell 单元	2.06×10 <sup>5</sup>	0.3	7 850
索塔钢材	Q345qE	beam 单元	2.06×10 <sup>5</sup>	0.3	7 850
斜拉索钢绞线	GJ15-15	line 单元	1.95×10 <sup>5</sup>	0.3	8 005
承台混凝土	C30	beam 单元	3.00×10 <sup>4</sup>	0.2	2 360

用 KTQZ 系列减震球型钢支座如表 2 所示,其布置方式如图 5 所示。由于该桥属于半漂浮体系,在塔桥交接处设置了竖向支承,在 ABAQUS 中使用 spring2 弹簧单元模拟该竖向支承。

表 2 支座型号及其布置

Tab. 2 Support models and their arrangement

支座号	支座型号	活动方向	承载力/kN	滑动方向位移/mm
1	KTQZ3000SX	多向活动	3 000	±200
2	KTQZ II 3000DX	切向活动	3 000	±200
3	KTQZ5000SX	多向活动	5 000	±150
4	KTQZ II 5000DX	切向活动	5 000	±150
5	KTQZ3000SX	多向活动	3 000	±200
6	KTQZ3000SX	多向活动	3 000	±200
7	KTQZ3000SX	多向活动	3 000	±200
8	KTQZ3000SX	多向活动	3 000	±200
9	KTQZ5000SX	多向活动	5 000	±150
10	KTQZ II 5000DX	切向活动	5 000	±150
11	KTQZ3000SX	多向活动	3 000	±200
12	KTQZ II 3000DX	切向活动	3 000	±200

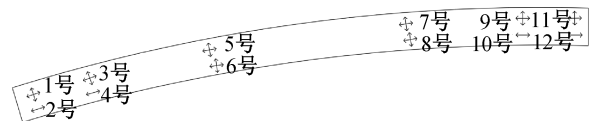


图 5 主梁支座布置情况

Fig. 5 Arrangement of main beam supports

## 2 移动荷载作用下曲线梁振动理论

针对移动荷载作用下曲线梁受迫振动的动力学方程组的求解,最常用和有效的方法是数值积分方法。应用 Newmark-β 法最终得到了曲线梁受迫振动的动力学方程组<sup>[18]</sup>,可表示为

$$M\{\ddot{X}\} + K\{X\} = \{P\} \quad (1)$$

式中:  $\{X\}$  为位移向量矩阵;  $M$  为质量矩阵;  $\{P\}$  为荷载向量矩阵;  $K$  为刚度矩阵。

本文基于通用有限元软件 ABAQUS,采用正弦波的形式模拟不平度,可用如下公式表达:

$$\gamma(x) = B_0 \sin\left(\frac{2\pi nx}{L_0}\right) \quad (2)$$

式中:  $L_0$  为不平度函数波长, m;  $B_0$  为不平度函数振幅, m;  $n$  为不平度有规律的波动次数<sup>[18]</sup>, 桥面平整时取 0。

由于不平度因素主要影响桥梁的竖向位移, 则可得到如下方程:

$$u_y(x, t) = q_{yi}(t) \sin\frac{\pi x}{L} + \gamma(x) \quad (3)$$

式中:  $q_{yi}(t)$  为桥梁竖向第  $i$  阶模态的广义坐标。

### 3 移动荷载作用下支座动态响应

基于有限元软件 ABAQUS,采用移动荷载模拟移动车辆,并采用正弦波的形式模拟桥面不平度<sup>[9]</sup>,对该桥塔梁交接处 5 号、6 号、7 号、8 号四处支座进行了移动荷载作用下的动态响应分析。选取支座弹簧单元质心应力作为研究对象,设置了车速、桥面不平度和车辆偏载三种工况组合。

#### 3.1 车速的影响

为研究车辆速度对钢箱梁曲线斜拉桥支座应力的影响,设置车速为 10、15、20、25 m/s,车重为 15 t,桥面不平度等级设置为 A 级。车辆匀速行驶

在钢箱梁曲线斜拉桥中线车道上。图 6(a)—(d) 分别为 5—8 号四处支座应力曲线图。由图 6(a)—(d) 可知,5、6 号支座最大应力响应出现在移动荷载经过该支座时,7、8 号支座最大应力响应情况亦是如此。当移动荷载作用在跨中时,四个支座处均产生较大振动,应力响应也相对较大。对比四处支座应力大小可知,外侧支座受力相对较大,但总体受力接近,无较大差别。在速度工况下,支座应力响应曲线趋势一致,随着移动荷载速度增大,四个支座的应力响应也随之增大,通过四幅图可知,速度对支座响应的影响并不显著。

#### 3.2 不平度的影响

为研究桥面不平度对钢箱梁曲线斜拉桥支座应力的影响,桥面不平度等级设置为 A、B、C、D 四个等级,车重为 15 t,车速为 20 m/s。车辆匀速行驶在钢箱梁曲线斜拉桥中线车道上。图 7 为 5—8 号四处支座应力曲线图。

由图 7 分析可知:随着不平度等级的提升,四处支座应力响应趋势基本一致,应力响应波动随之更加剧烈,应力峰值均出现在移动荷载作用于该支座时。桥面不平度等级为 D 级时,应力波动性最强,通过对比峰值变化可知,桥面不平度等级对支座有较大影响。

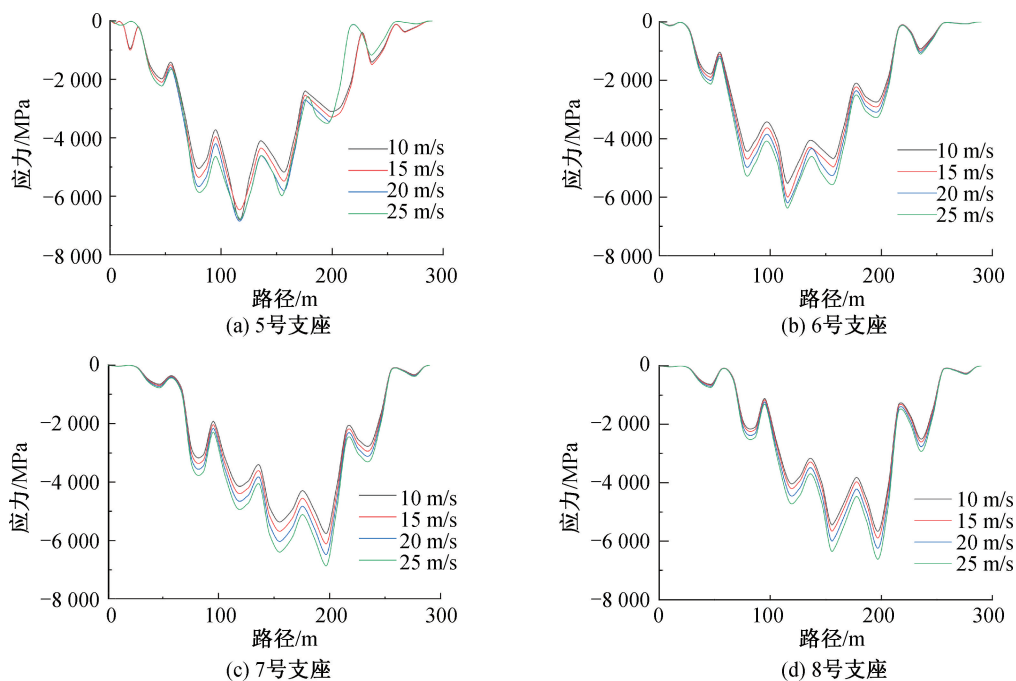


图 6 不同车速影响下的支座应力响应

Fig. 6 Stress response of the support under the influence of different vehicle speeds

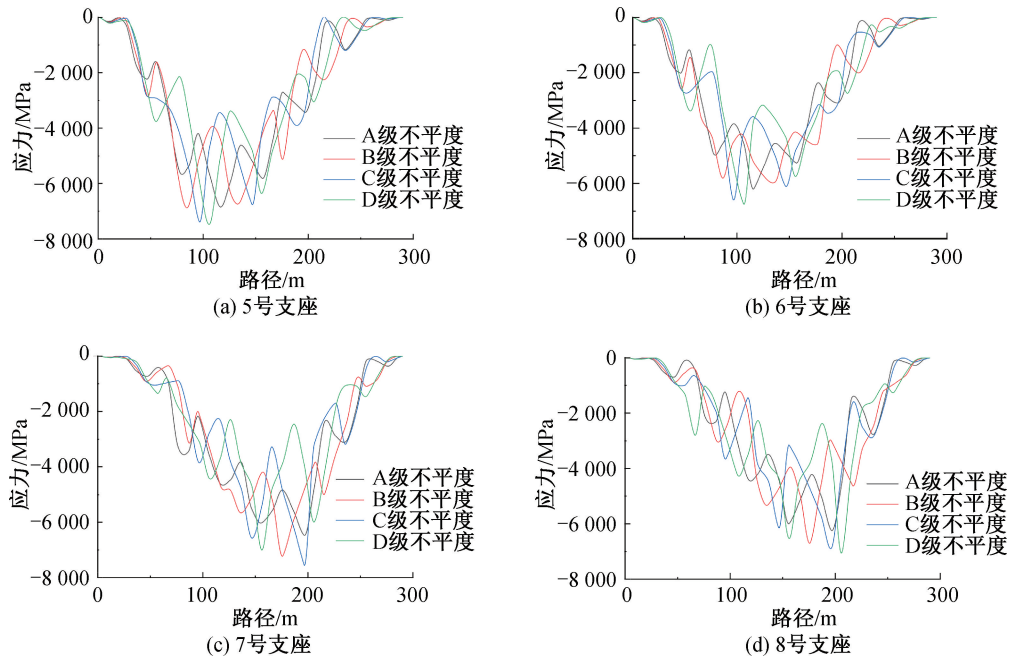


图 7 不平度影响下的支座应力响应

Fig. 7 Stress response of the support under the influence of different unevenness

### 3.3 偏载的影响

为研究车辆偏载对钢箱梁曲线斜拉桥支座应力的影响,移动荷载分别在内侧车道、中间车道及外侧车道匀速移动,车重为 15 t,车速为 20 m/s。图 8(a)—(d) 分别为 5—8 号四处支座应力曲线图。

由图 8 分析可知:在偏载工况下,四处支座应力响应曲线趋势基本一致,模拟偏载工况对支座应力响应影响较大。通过对比内外偏载的应力响应可知,内外偏载对支座应力响应的影响几乎无差异,外偏载时应力响应稍大,但峰值差异极小。内外偏载的峰值接近,侧面反映了桥梁内外支座受力均匀,并未出现主梁侧翻现象。

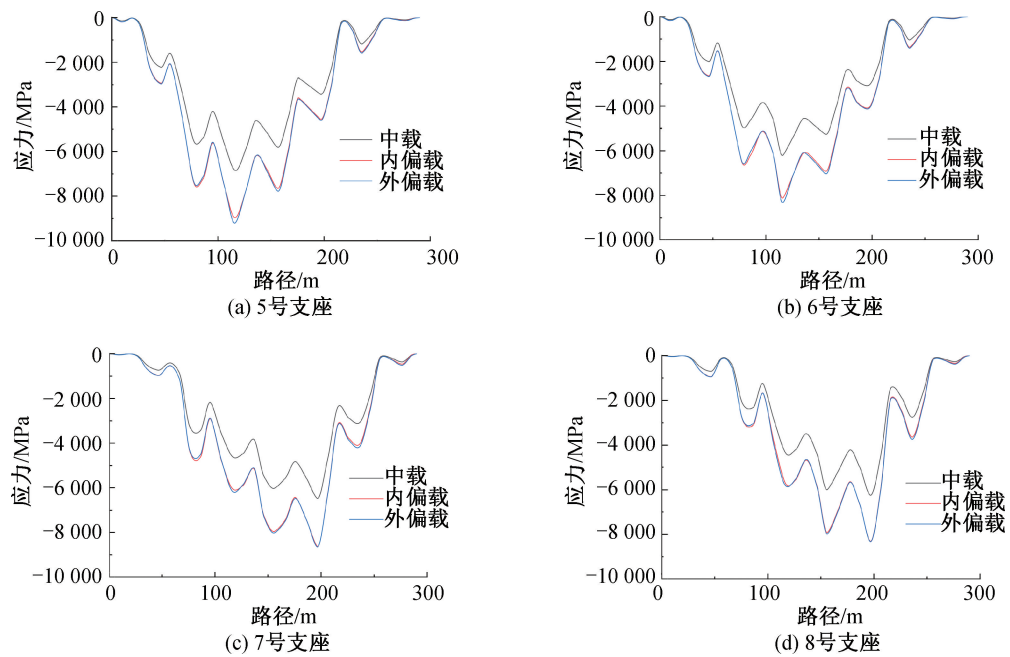


图 8 不同偏载工况影响下的支座应力响应

Fig. 8 Stress response of the support under different eccentric load conditions

## 4 结论

1) 车辆经过桥梁时,塔梁交接处支座最大应力响应均出现在车辆行驶至自身位置时,当车辆行驶至跨中时会产生较大振动。支座应力随车速增加而增大,但车速对支座应力的整体影响较小;桥面不平度对支座应力影响较大,应力波动随桥面不平度等级增加而加剧;车辆偏载对支座应力影响较大,但内外偏载工况对支座应力影响极小,并未出现主梁侧翻隐患。

2) 半漂浮曲线斜拉桥支座处振动较为剧烈,这易造成桥梁部件的疲劳。本研究桥梁采用钢结构部件,各部件连接处因长期振动,可能出现松动甚至断裂的现象,因此需要定期监测和维护。

3) 车辆行驶在钢箱梁曲线斜拉桥上时,由于此桥为半漂浮体系,产生较大振动,桥面铺装层要注意养护,防止桥梁产生更大振动引起部件损坏。

### 参考文献:

- [1] 项海帆. 高等桥梁结构理论[M]. 北京: 人民交通出版社, 2013.  
XIANG H F. Advanced bridge structural theories[M]. Beijing: China Communications Press, 2013.
- [2] 邵容光, 夏 淦. 混凝土弯梁桥[M]. 北京: 人民交通出版社, 1994.  
SHAO R G, XIA G. Concrete curved girder bridges[M]. Beijing: China Communications Press, 1994.
- [3] 韩智强, 谢 刚, 李路遥, 等. 大跨连续梁桥车桥耦合振动响应[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(11): 4588-4595.  
HAN Z Q, XIE G, LI L Y, et al. Vehicle-bridge coupling vibration response of long-span continuous girder bridge[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(11): 4588-4595.
- [4] 马玉龙. 公路曲线连续梁桥车桥耦合振动研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2014.  
MA Y L. Analysis of vehicle-bridge coupling vibration on highway curved continuous beam bridge[D]. Changsha: Hunan University, 2014.
- [5] 刘 星, 李韶华, 司春棣, 等. 曲线梁桥在车辆荷载下的动力响应研究[J]. 动力学与控制学报, 2020, 18(2): 50-58.  
LIU X, LI S H, SI C D, et al. Dynamic response of curved girder bridge under random vehicle loads[J]. Journal of Dynamics and Control, 2020, 18(2): 50-58.
- [6] 展艳凯. 考虑横竖向车桥耦合振动下曲线梁桥的受力性能研究[D]. 西安: 长安大学, 2023.  
ZHAN Y K. Research on the mechanical performance of curved beam bridges considering coupled vibration of horizontal and vertical vehicles and bridges[D]. Xi'an: Chang'an University, 2023.
- [7] 陈水生, 罗 浩, 桂水荣. 曲线连续梁桥在车辆制动作用下的动力响应[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2020, 42(2): 95-106.  
CHEN S S, LUO H, GUI S R. Dynamic response of curved continuous girder bridge under vehicle braking[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering (Chinese and English), 2020, 42(2): 95-106.
- [8] 陈水生, 罗 浩, 桂水荣. 曲率半径对连续曲线梁桥车桥耦合振动的影响[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2020, 36(2): 290-298.  
CHEN S S, LUO H, GUI S R. Effect of curve radius on vehicle-bridge coupled vibration of continuous curved girder bridge[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science Edition), 2020, 36(2): 290-298.
- [9] 陈水生, 罗 浩, 桂水荣. 连续曲线梁桥在多车荷载作用下的动力响应[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2020, 41(1): 118-124.  
CHEN S S, LUO H, GUI S R. Dynamic response of continuous curved bridge under multi-vehicle loading[J]. Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition), 2020, 41(1): 118-124.
- [10] NAZZAL K. An investigation of vibration of horizontally curved bridge in highway feeder ramps[J]. A Dissertation for Doctor of Philosophy in Civil Engineering, 2004.
- [11] YANG Y B, WU C M, YAU J D. Dynamic response of a horizontally curved beam subjected to vertical and horizontal moving loads[J]. Journal of Sound and Vibration, 2001, 242(3): 519-537.
- [12] IWASE T, HIRASHIMA K I. Dynamic responses of multi-span curved beams with nonuniform section subjected to moving loads[J]. Trans JSME, 2003, 69(12): 1723-1730.
- [13] DING H. Adomian polynomials for nonlinear response of supported Timoshenko beams subjected to a moving harmonic load[J]. Acta Mechanica Solida Sinica, 2014, 27(4): 383-393.
- [14] 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.

(下转第 69 页)

- Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(10): 1945-1956.
- [6] 覃木庆, 范刚. 岩质边坡地震加速度放大效应研究[J]. 湖南交通科技, 2015, 41(1): 7-10.  
QIN M Q, FAN G. Study on amplification effects of seismic acceleration for rock slopes [J]. Hunan Communication Science and Technology, 2015, 41(1): 7-10.
- [7] 冯志仁, 刘红帅, 于龙. 地震作用下含软弱夹层顺层岩质边坡表面放大效应研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2014, 34(1): 96-100.  
FENG Z R, LIU H S, YU L. Surface amplification effect of bedding rocky slope with weak interlayer under earthquake [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2014, 34(1): 96-100.
- [8] 王学伍, 张彦君, 万驰, 等. 地震作用下含软弱夹层的顺倾岩质边坡加速度放大效应探究[J]. 水利与建筑工程学报, 2019, 17(3): 37-41.  
WANG X W, ZHANG Y J, WAN C, et al. Acceleration amplification effects of bedding rock slope with weak interlayer under earthquake [J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2019, 17(3): 37-41.
- [9] 邢昊. 边坡地形的地震动放大效应预测模型研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2015.  
XING H. Modelling of response spectral amplification ratios from slope topography [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2015.
- [10] 刘彪. 边坡地震动力放大与永久位移分析[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2019.  
LIU B. Seismic dynamic amplification and permanent displacement analysis of slope [D]. Beijing: China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2019.
- [11] CHEN W F. Limit analysis and soil plasticity [M]. Rotterdam, The Netherlands: Elsevier, 1975.
- [12] 郑颖人, 赵尚毅. 边(滑)坡工程设计中安全系数的讨论[J]. 岩石力学与工程学报, 2006(9): 1937-1940.  
ZHENG Y R, ZHAO S Y. Discussion on safety factors of slope and landslide engineering design [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006(9): 1937-1940.
- [13] 陈祖煜. 土质边坡稳定分析: 原理·方法·程序 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2003.  
CHEN Z Y. Stability analysis of soil slopes: Principles, methods, programs [M]. Beijing: China Water & Power Press, 2003.
- [14] MICHALOWSKI R L. Stability charts for uniform slopes [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2002, 128(4): 351-355.  
(责任编辑 周雪梅)
- 
- (上接第62页)
- [15] 陈博宇. 车辆荷载作用下钢箱梁曲线斜拉桥力学性能分析[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2024.  
CHEN B Y. Analysis of mechanical properties of steel box girder curved cable-stayed bridge under vehicle load [D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University, 2024.
- [16] 王刘栓. 异形桥塔斜拉桥结构受力分析和施工监控研究[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2021.  
WANG L S. Research on structural stress analysis and construction monitoring of special-shaped pylon cable-stayed bridge [D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University, 2021.
- [17] 肖军良, 张小江. 大跨径曲线斜拉桥主梁有限元模拟办法[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2020, 16(2): 149-152.  
XIAO J L, ZHANG X J. Finite element simulation methods for the main girder of long-span curved cable-stayed bridges [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development (Application Technology Edition), 2020, 16(2): 149-152.
- [18] 谈世琪. 车-曲线桥耦合系统振动及动力学行为分析[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2021.  
TAN S Q. Vibration of vehicle-curved bridge coupling system and dynamic analysis [D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University, 2021.  
(责任编辑 周雪梅)