

全漂浮空间框架塔斜拉桥参数敏感性分析

刘岸清¹,燕腾飞¹,郑鹏举¹,谷彦霖¹,李杰²,王强¹

(1. 中国建筑第七工程局,河南 郑州 450000;2. 郑州大学 土木工程学院,河南 郑州 450001)

摘要:为明确设计参数对漂浮体系斜拉桥力学行为影响,该文以某全漂浮体系空间框架式独塔双索面钢-混凝土组合梁斜拉桥为依托,利用有限元分析软件MIDAS/Civil建立大桥有限元模型,针对成桥状态下温度效应、二期恒载、支承体系等参数敏感性开展分析,并与该桥半漂浮体系进行对比。结果表明:温度、二期恒载对主梁挠度和应力影响较为显著;整体而言,全漂浮体系主梁变形和应力对各参数敏感度低于半漂浮体系;结构体系由全漂浮转换为半漂浮后,1阶自振频率由0.38 Hz增至1.09 Hz,结构整体刚度显著提高;地震激励下,全漂浮体系较半漂浮体系整体位移大,但塔根部结构弯矩减小。

关键词:斜拉桥;全漂浮体系;半漂浮体系;空间框架塔;结构参数;敏感性分析

中图分类号:U442.5;U448.27

文献标志码:A

Sensitivity Analysis of Parameters of Cable-Stayed Bridges with Full Floating Spatial Frame

LIU Anqing¹,YAN Tengfei¹,ZHENG Pengju¹,GU Yanlin¹,LI Jie²,WANG Qiang¹

(1. China Construction Seventh Engineering Division Corp., Ltd., Zhengzhou, Henan 450000, China; 2. School of Civil Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou, Henan 450001, China)

Abstract: In order to clarify the influence of design parameters on the mechanical behavior of a cable-stayed bridge of a floating system, a finite element model of the bridge was established by using the finite element analysis software MIDAS/Civil based on a single-tower double-cable plane steel-concrete composite beam cable-stayed bridge with full floating spatial frame. The sensitivity of parameters such as temperature effect, secondary dead load, and support system in the completed bridge state was analyzed and compared with the semi-floating system of the bridge. The results show that temperature and secondary dead load have a significant impact on the deflection and stress of the main beam. Overall, the sensitivity of the deformation and stress of the main beam of the full floating system to various parameters is lower than that of the semi-floating system. After the structural system is converted from full floating to semi-floating, the first-order natural frequency increases from 0.38 Hz to 1.09 Hz, and the overall stiffness of the structure is significantly improved. Under seismic excitation, the overall displacement of the full floating system is greater than that of the semi-floating system, but the bending moment of the tower root structure decreases.

Keywords: cable-stayed bridge; full floating system; semi-floating system; spatial frame tower; structural parameter; sensitivity analysis

0 引言

全漂浮体系斜拉桥是采用多根高强度拉索使主梁处于悬浮状态的高次超静定结构,这种桥梁相比其他类型桥梁对设计参数变化具有更高敏感性。由

于施工过程中各种不利影响因素较多,导致实际成桥后结构参数与设计参数存在差异,从而进一步对力学行为产生影响^[1-5]。近年来,一些专家学者针对斜拉桥参数敏感性做了大量研究,如张丰等^[6]研究了成桥状态的主梁线形、控制截面应力、斜拉索索力对钢

收稿日期:2023-06-25

基金项目:河南省交通运输科技计划项目(编号:2021J2)

作者简介:刘岸清,男,硕士,工程师.E-mail:2270744388@qq.com

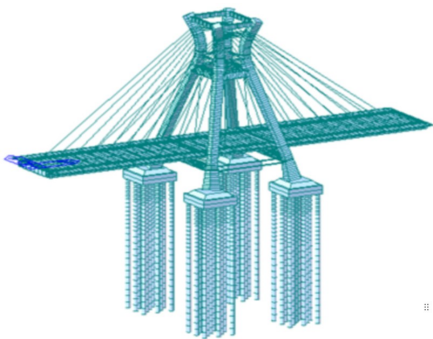
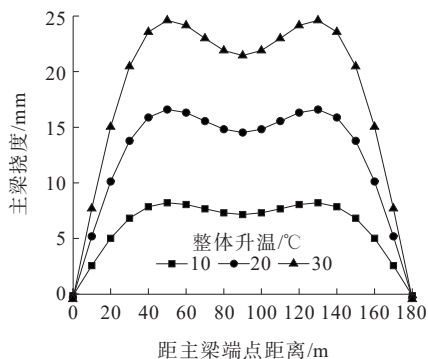


图2 有限元模型

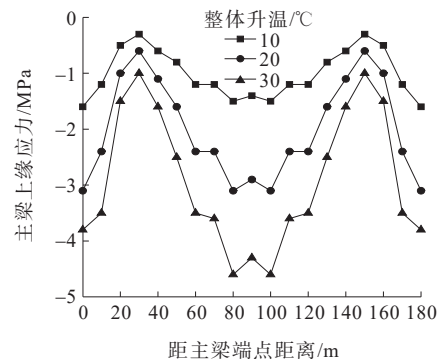
Figure 2 Finite element model

2.2 主要结构参数

结合本桥结构特点,选取整体升温、二期恒载及



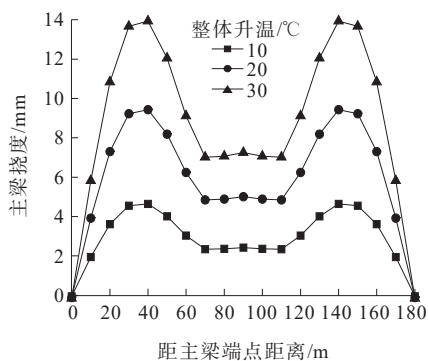
(a) 挠度



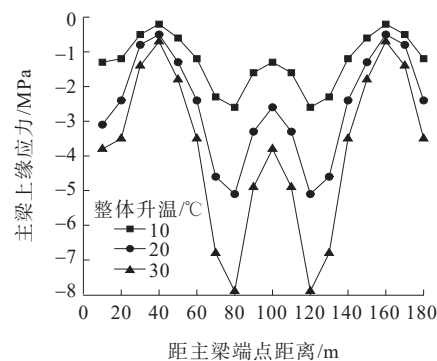
(b) 上缘组合应力

图3 全漂浮体系主梁挠度和应力

Figure 3 Deflection and stress of main beam of full floating system



(a) 挠度



(b) 上缘组合应力

图4 半漂浮体系主梁挠度和应力

Figure 4 Deflection and stress of main beam of semi-floating system

由图3可知:

(1) 整体升温作用下,主梁整体上挠。随着桥梁整体温度增加,主梁挠度逐渐增加,挠度最大变幅发生在主梁1/3跨附近,主梁挠度变幅和温度变化基本呈线性相关。

(2) 主梁应力随着整体升温而增加,因为随着主

支承体系等设计参数。对于地震响应分析,结合工程所在场地、特征周期等参数,选取 Taft波进行时程分析,采用单因素变量分析法进行对比分析。限于篇幅,仅给出主梁上缘组合应力和挠度对各静力参数敏感度,动力参数敏感性指标主要分析塔顶位移、塔脚弯矩、主梁跨中位移和弯矩。

3 参数敏感性分析

3.1 温度效应

温度效应分析采取整体升温 10 °C、20 °C、30 °C,全漂浮体系和半漂浮体系主梁挠度及上缘组合应力见图3、4。

梁整体升温,主梁变形增大,受拉索和支座约束作用,主梁伸缩受到一定限制,引起主梁应力增加。整体温度主要导致主梁支座和跨中截面上缘应力增幅较大。

对比图3、4可知:

(1) 全漂浮体系跨中挠度远大于半漂浮体系,但

半漂浮体系主梁1/4跨附近变形出现较大转折,易使半漂浮体系主梁应力分布不均,不利于主梁受力。

(2) 半漂浮体系跨中主梁应力相对较小,但在主梁1/3跨附近,半漂浮体系的应力高于全漂浮体系的;就主梁线形变化和应力整体分布而言,全漂浮体系主梁变形较平缓,应力分布更均衡,有利于主梁承载。

(3) 全漂浮体系主梁应力受温度影响小于半漂

浮体系,主要得益于全漂浮体系主梁约束较少,更易释放温度变化产生的附加内力。全漂浮体系主梁挠度受温度影响大于半漂浮体系。

3.2 二期恒载效应

二期荷载集度 q 分别增加1%、3%、5%,分析二期恒载变化对结构影响。二期恒载对全漂浮体系和半漂浮体系主梁影响见图5、6。

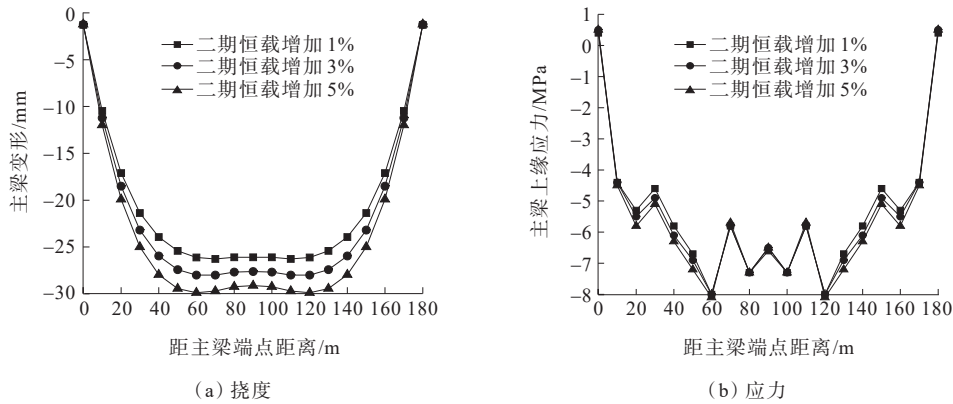


图5 全漂浮体系主梁挠度和应力

Figure 5 Deflection and stress of main beam of full floating system

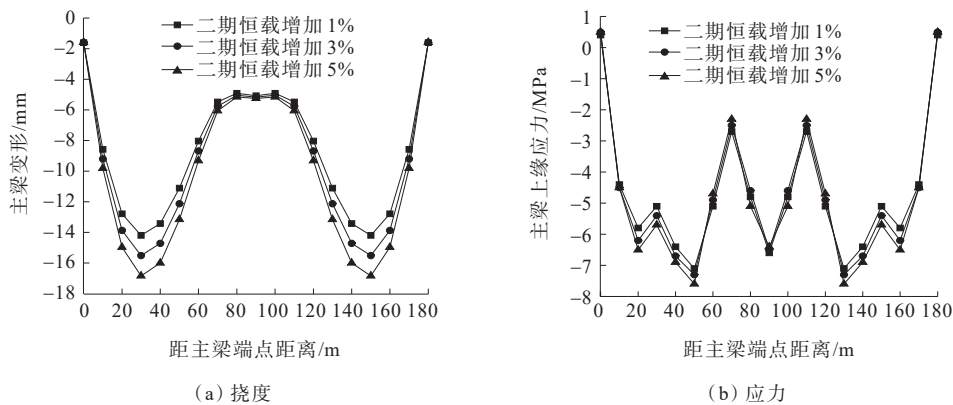


图6 半漂浮体系主梁挠度和应力

Figure 6 Deflection and stress of main beam of semi-floating system

由图5可知:全漂浮体系主梁变形和应力均随着二期恒载增加而增加,主梁挠度和应力最大变幅均发生在1/3跨附近,而跨中附近主梁变形和应力受二期恒载影响相对较小,主要与全漂浮体系斜拉桥主梁支承方式有关,全漂浮体系斜拉桥主梁通过拉索和两端支座约束,跨中由限位阻尼器和垂直拉索约束,使得主梁两端和跨中约束大于其他部位。因此,主梁跨中内力和变形受二期恒载变化影响较小。分析表明:二期恒载每增加2%,主梁挠度和应力最大增幅分别为8.52%和6.5%,7.85%和5.45%。可见,二期恒载对主梁内力和变形影响较显著。

由图6可知:随着二期恒载增加,主梁挠度和应力随之增加;半漂浮体系主梁挠度最大变幅位置在1/6跨附近,主梁应力最大变幅位置则发生在跨中。对比图5可知:二期恒载对半漂浮体系主梁变形及内力影响更为显著,由于半漂浮体系跨中位置增设了竖向支承,主梁跨中下挠量减小,造成主梁线形起伏较大,应力集中现象较显著,导致半漂浮体系主梁受影响较大。

3.3 支承体系对自振特性影响分析

根据依托斜拉桥结构特点,分析前60阶自振特性。限于篇幅,仅给出全漂浮体系第1阶振型模态,

见图7。全漂浮体系、半漂浮体系前3阶振型特点见表1。

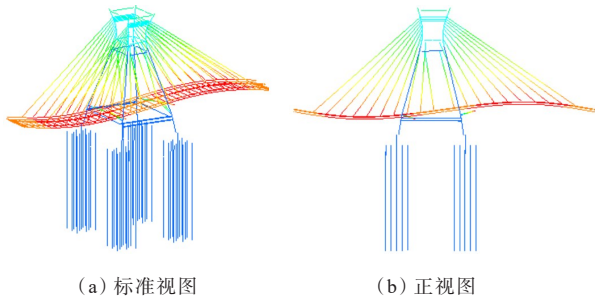


图7 1阶自振模态($f=0.38\text{ Hz}$, $T=2.65\text{ s}$)

Figure 7 First-order natural vibration mode
($f=0.38\text{ Hz}$, $T=2.65\text{ s}$)

表1 斜拉桥自振特性

Table 1 Natural vibration characteristics of cable-stayed bridge

模态数	全漂浮体系			半漂浮体系		
	自振周期/s	自振频率/Hz	振型描述	自振周期/s	自振频率/Hz	振型描述
1	2.65	0.38	主梁纵漂+竖弯	0.91	1.09	主塔纵弯+主梁竖弯
2	1.32	0.76	主梁横弯	0.85	1.17	主塔横弯
3	0.92	1.09	主梁竖弯+主塔纵弯	0.73	1.37	主塔扭转+主梁扭转

由表1可知:①对于全漂浮体系,振动频率逐渐增加,主梁开始发生横弯,第3阶模态主塔开始伴随主梁竖弯发生纵向弯曲,结构表现为塔强梁弱,空间框架塔设计有利于限制主梁结构纵向变形,主梁发生纵漂时避免出现过大纵向变形,提高桥梁抗震性能;②半漂浮体系斜拉桥1阶振型表现为主梁纵漂、竖弯+主塔纵向弯曲,竖向支承增强了主梁与索塔整体联系,受主梁纵漂影响,半漂浮体系索塔先于全漂浮体系发生纵向弯曲;半漂浮体系斜拉桥1阶频率为1.09 Hz,远大于全漂浮体系0.38 Hz,表明半漂浮体系斜拉桥纵桥向刚度大于全漂浮体系。可见,主梁增加竖向支承使得斜拉桥边界约束加强,整体刚度增加;③主梁支承体系对结构动力行为影响较大,斜拉桥不同支承体系对结构自振特性影响较显著。

3.4 地震响应主梁、桥塔位移时程分析

采用直接积分法对结构进行抗震分析,不考虑黏滞阻尼器对结构动力响应影响,采用一致激励输入地震波。时程分析荷载工况仅考虑地震效应,在纵桥向地震波和横桥向地震波一致激励作用下,塔顶位移时程见图8、9,主梁跨中位移时程见图10、11。

由图8~图11可知:

(1)由图8、10可知:纵桥向地震激励下,半漂浮

由图7及表1可知:1阶振型以主梁纵漂为主,竖弯为次要振型,基本频率为0.38 Hz,基本自振周期为2.65 s,与依托斜拉桥主跨径和空间框架塔构造有一定可比性的郑州北引水渠桥自振周期(2.795 s^[13])相接近。与主跨径较接近的漂浮体系常规独塔斜拉桥相比,例如:松花江大桥(自振周期7.94 s,主跨径268 m)、松原大桥(自振周期3.57 s,主跨径120 m)、海河大桥(自振周期9.39 s,主跨径310 m)^[14]、渭河大桥(自振周期8.60 s,主跨径200 m)^[15],本桥自振周期较小,分析原因可知:一方面,本桥跨径小刚度大;另一方面,依托斜拉桥空间框架索塔显著增加了结构整体刚度。

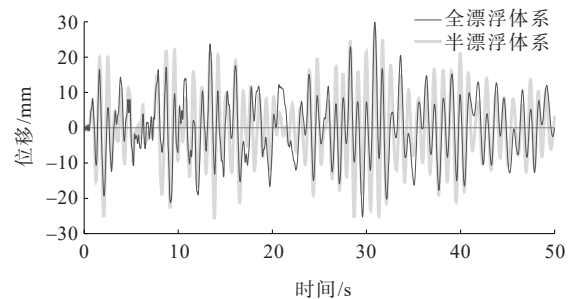


图8 Taft-X地震波激励下塔顶X向位移时程

Figure 8 Variation of displacement of tower top in X-direction with time under Taft-X seismic wave excitation

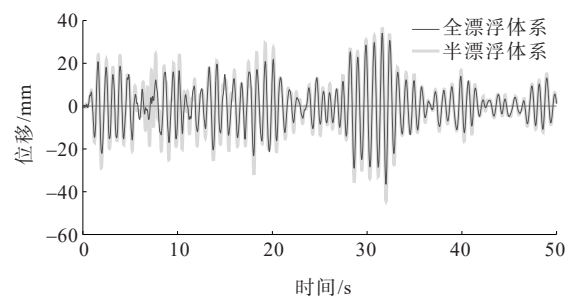


图9 Taft-Y地震波激励下塔顶Y向位移时程

Figure 9 Variation of displacement of tower top in Y-direction with time under Taft-Y seismic wave excitation

体系塔顶位移峰值小于全漂浮体系,减小率为7.3%,半漂浮体系主梁跨中纵桥向位移峰值小于全漂浮体

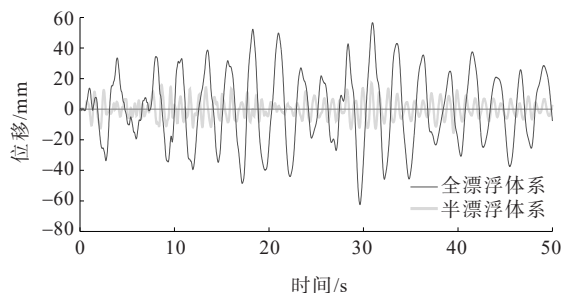


图10 Taft-X地震波激励下主梁跨中X向位移时程

Figure 10 Variation of displacement of main beam midspan in X-direction with time under Taft-X seismic wave excitation

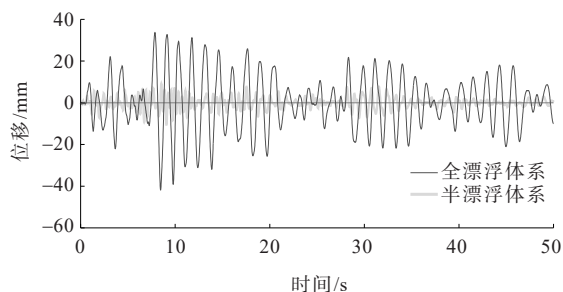


图11 Taft-Y地震波激励下主梁跨中Y向位移时程

Figure 11 Variation of displacement of main beam midspan in Y-direction with time under Taft-Y seismic wave excitation

系,减小率为72.58%;由图9、11可知:横桥向地震激励下,半漂浮体系横桥向塔顶位移峰值大于全漂浮体系,增长率为22.01%,半漂浮体系主梁横桥向位移峰值小于全漂浮体系,减小率为74.99%。

(2) 半漂浮体系塔顶及主梁跨中位移较快达到极值,由于全漂浮体系结构偏柔性,结构地震响应相对迟缓,能有效耗散地震能,抗震效果较好;半漂浮体系与全漂浮体系相比,塔顶纵桥向位移极值减小7.3%,塔顶横桥向位移极值增加22.01%;主梁跨中纵桥向和横桥向位移极值分别减小72.58%和74.99%。分析表明:由于主梁纵桥向摆幅较大,索塔受到纵桥向惯性力大,使全漂浮体系纵桥向塔顶位移极值高于半漂浮体系;全漂浮体系主梁横桥向摆幅小于纵桥向,施加于索塔惯性力随之减小,但依旧是半漂浮体系主梁横桥向位移极值的4倍。因此,横桥向地震激励下,全漂浮体系主梁横桥向惯性力减小的同时,又通过主梁摆动耗能,使全漂浮体系塔顶位移极值小于半漂浮体系。

(3) 索塔塔顶及主梁跨中位移在横桥向地震激励下位移周期较纵桥向地震激励短,表明:斜拉桥横桥向刚度大于纵桥向,因为主梁纵桥向约束弱于横

桥向,且空间框架塔横桥向塔柱间距大于纵桥向;不同支承体系对主梁位移影响较大,对塔顶位移影响较次要;对比纵桥向和横桥向地震激励下主梁位移,全漂浮体系主梁纵桥向位移极值高于横桥向,增长率为48.77%,可见主梁跨中设置横向弹性索对于降低主梁横向位移效果显著,有效降低地震作用下塔梁碰撞风险。该全漂浮体系斜拉桥以主梁纵向摆动耗能为主,横向摆动耗能为辅。

3.5 地震响应主梁、塔底弯矩时程分析

地震波激励下主梁、塔底弯矩时程如图12~15所示。

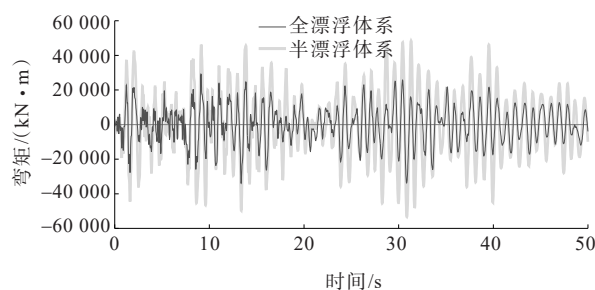


图12 Taft-X地震波激励下塔脚弯矩时程

Figure 12 Variation of bending moment of tower foot with time under Taft-X seismic wave excitation

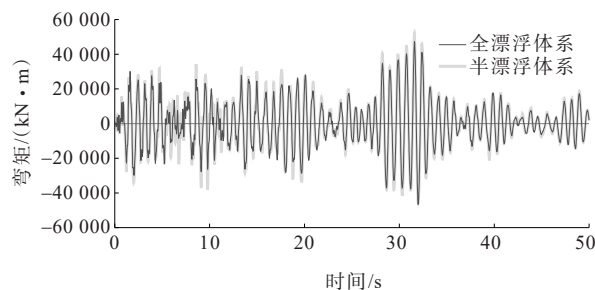


图13 Taft-Y地震波激励下塔脚弯矩时程

Figure 13 Variation of bending moment of tower foot with time under Taft-Y seismic wave excitation

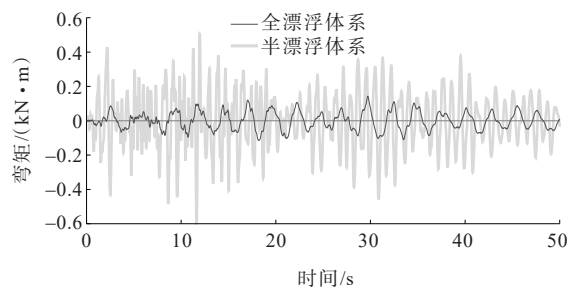


图14 Taft-X地震波激励下主梁跨中弯矩时程

Figure 14 Variation of bending moment of main beam midspan with time under Taft-X seismic wave excitation

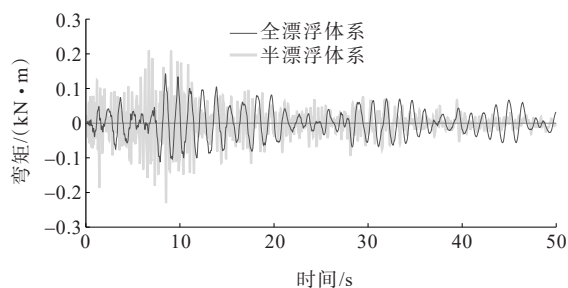


图 15 Taft-Y地震波激励下主梁跨中弯矩时程

Figure 15 Variation of bending moment of main beam midspan with time under Taft-Y seismic wave excitation

由图 12~15 可知:

(1) 纵桥向地震激励下,全漂浮体系塔脚及主梁跨中弯矩峰值分别为 $33\,990\text{ kN}\cdot\text{m}$ 、 $0.143\text{ kN}\cdot\text{m}$,半漂浮体系塔脚及主梁跨中弯矩峰值分别为 $53\,320\text{ kN}\cdot\text{m}$ 、 $0.608\text{ kN}\cdot\text{m}$,半漂浮体系塔脚和主梁跨中弯矩峰值分别比全漂浮体系高 56.87% 、 325.17% 。横桥向地震激励下,两种支承体系塔脚和主梁跨中弯矩对比规律同纵桥向地震激励,限于篇幅,不再赘述。

(2) 同地震波激励下,半漂浮体系塔脚和主梁均比全漂浮体系承受更大弯矩,可见全漂浮体系主梁摆动耗能效果显著,有效降低了结构弯矩,提高了结构抗震性能。

(3) 对比索塔和主梁在纵桥向和横桥向地震激励下弯矩可知,地震作用下,索塔主要起承力作用,主梁通过纵桥向摆动辅助耗能,自身受力和变形相对较小。因此,地震激励下主梁弯矩相对较小。

4 结论

(1) 随着桥梁整体升温,主梁挠度逐渐增加,主梁变形在 $1/3$ 跨附近对温度最为敏感,主梁挠度变幅和温度变化基本呈线性相关;主梁上缘应力随着整体升温而增加,其中主梁支座和跨中截面上缘应力增幅较大;就主梁线形变化和应力整体分布而言,全漂浮体系主梁变形较为平缓,应力分布更加均衡,有利于主梁承载,全漂浮体系主梁应力受温度影响小于半漂浮体系,这主要得益于全漂浮体系主梁约束较少。

(2) 全漂浮体系主梁变形和应力均随着二期恒载增加而增加,主梁挠度和应力变幅最大位置均发生在 $1/3$ 跨附近;二期恒载对半漂浮体系主梁变形及内力影响更为显著。

(3) 依托工程 1 阶模态振型为主梁纵漂+竖弯,索塔刚度较大,主梁相对较柔;受主梁纵漂影响,索塔较早出现纵向弯曲;结构基频为 0.38 Hz ,基本自振周期为 2.65 s ,与类似结构斜拉桥较为接近;与主跨径较接近的漂浮体系独塔斜拉桥相比,本桥自振周期较小,主要由于该桥空间框架索塔塔柱间距较宽,且跨度较小,大幅度提高了斜拉桥整体刚度和稳定性。

(4) 全漂浮体系转换体系后,其自振频率显著增加,达到 1.09 Hz ,结构整体刚度高于全漂浮体系;结构振型变化显著,1 阶振型表现为主梁纵漂、竖弯+主塔纵向弯曲,结构整体性增加显著。

(5) 纵桥向地震激励下,半漂浮体系塔顶位移及主梁跨中纵桥向位移峰值小于全漂浮体系;横桥向地震激励下,半漂浮体系横桥向塔顶位移峰值大于全漂浮体系,半漂浮体系主梁横桥向位移峰值小于全漂浮体系;半漂浮体系塔顶及主梁跨中位移较快达到极值,由于全漂浮体系结构偏柔性,结构地震响应相对迟缓,能有效耗散地震能,抗震效果较好;全漂浮体系主梁通过纵向摆动耗能降低了地震激励产生的结构弯矩,有效增强了全漂浮体系抗震性能。因此,全漂浮体系结构抗震性能优于半漂浮体系,同时也说明不同支承体系对结构地震响应影响较显著。

参考文献:

References:

- [1] 张亚海,朱斌,郭宝圣,等.大跨钢箱梁斜拉桥施工期结构参数敏感性分析[J].中外公路,2020,40(5): 70-75.
ZHANG Yahai,ZHU Bin,GUO Baosheng,et al.Structural parametric sensitivity analysis of long-span cable-stayed bridge with steel box-girders during construction[J].Journal of China & Foreign Highway,2020,40(5): 70-75.
- [2] 肖春名,廖盛荣,赵晨光,等.V 字形矮塔斜拉桥结构参数敏感性分析研究[J].公路,2023,68(1): 187-193.
XIAO Chunming,LIAO Shengrong,ZHAO Chenguang,et al. Sensitivity analysis of structural parameters of V-shaped low-pylon cable-stayed bridge[J].Highway,2023,68(1): 187-193.
- [3] 过黄喜.钢-混凝土混合梁三塔斜拉桥结构参数敏感性分析[J].公路与汽运,2022(4): 86-88,138.
GUO Huangxi. Sensitivity analysis of structural parameters of steel-concrete mixed beam three-tower

- cable-stayed bridge[J]. Highways & Automotive Applications,2022(4): 86-88,138.
- [4] 杨如刚,陈博,韩冰.大跨叠合梁斜拉桥主梁施工控制误差传播分析[J].中外公路,2023,43(5):148-155.
- YANG Rugang, CHEN Bo, HAN Bing. Analysis of error propagation in construction control of main beams of large-span composite beam cable-stayed bridges[J]. Journal of China & Foreign Highway,2023,43(5):148-155.
- [5] 涂光亚,石洋,邹磊.大跨度钢混组合梁斜拉桥钢主梁截面参数对成桥状态主梁受力敏感性分析[J].中外公路,2022,42(1):108-114.
- TU Guangya, SHI Yang, ZOU Lei. Sensitivity analysis of section parameters of steel main girder of long-span cable-stayed bridge with steel-concrete composite girder on mechanical behavior of main girder in completion state[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2022, 42(1): 108-114..
- [6] 张丰,颜东煌,陈常松.大跨度组合梁斜拉桥成桥状态参数敏感性分析[J].交通科学与工程,2021,37(2): 91-97.
- ZHANG Feng, YAN Donghuang, CHEN Changsong. Parameter sensitivity analysis of the long-span composite girder cable-stayed bridge in the finished bridge state[J]. Journal of Transport Science and Engineering,2021,37(2): 91-97.
- [7] 邬晓光,杜仕朝,康春霞.双钢拱塔斜拉桥参数敏感性分析[J].公路,2016,61(9): 143-148.
- WU Xiaoguang, DU Shizhao, KANG Chunxia. Parameters sensitiveness analysis of special shaped cable stayed bridge with steel arch tower[J]. Highway, 2016, 61(9): 143-148.
- [8] 唐启.泉州湾跨海大桥钢混组合梁施工控制参数敏感性分析[J].世界桥梁,2016,44(5): 57-61.
- TANG Qi. Sensitivity analysis of construction control parameters of steel-concrete composite girder of Quanzhou Bay Sea-Crossing Bridge[J]. World Bridges, 2016,44(5): 57-61.
- [9] 佟志峰,熊雷,刘小奇,等.单索面独塔斜拉桥桥塔施工关键设计参数影响研究[J].中外公路,2022,42(4):47-52.
- TONG Zhifeng, XIONG Lei, LIU Xiaoqi, et al. Study on key design parameters of the constructional safety of the leaning single-tower cable-stayed bridges[J]. Journal of China & Foreign Highway,2022,42(4):47-52.
- [10] 刘增武,辛景舟,周水兴,等.异形索塔斜拉桥参数敏感性分析[J].中外公路,2020,40(5): 76-80.
- LIU Zengwu, XIN Jingzhou, ZHOU Shuixing, et al. Analysis of parametric sensitivity of cable-stayed bridge with shaped single tower[J]. Journal of China & Foreign Highway,2020,40(5): 76-80.
- [11] 杨懋,缪长青,王旭东.斜弯独塔混合梁斜拉桥参数敏感性分析[J].科学技术与工程,2022,22(28): 12642-12650.
- YANG Mao, MIAO Changqing, WANG Xudong. Parameter sensitivity analysis of the inclined curved single tower hybrid girder cable-stayed bridge[J]. Science Technology and Engineering,2022,22(28): 12642-12650.
- [12] 赵体波,张武盛,荣峤,等.波纹钢腹板矮塔斜拉桥结构静动力分析[J].铁道建筑,2020,60(7): 6-9.
- ZHAO Tibo, ZHANG Wusheng, RONG Qiao, et al. Static and dynamic analysis on extradosed cable-stayed bridge structure with corrugated steel web[J]. Railway Engineering,2020,60(7): 6-9.
- [13] 艾伏平,徐俊,廖崇庆.郑东新区龙湖内环路跨北引水渠桥的方案设计[J].城市道桥与防洪,2016(7): 140-143,17.
- AI Fuping, XU Jun, LIAO Chongqing. Scheme design of ring road crossing north water diversion canal bridge within Longhu of Zhengdong new district[J]. Urban Roads Bridges & Flood Control,2016(7): 140-143,17.
- [14] 张文学,陈盈,寇文琦,等.基于反应谱法的低重心斜拉桥判定简化计算[J].中南大学学报(自然科学版),2018,49(7): 1793-1798.
- ZHANG Wenxue, CHEN Ying, KOU Wenqi, et al. Simplified criterion for low gravity center cable-stayed bridge based on response spectrum[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2018, 49(7): 1793-1798.
- [15] 白国良,史庆轩,杨应华,等.咸阳渭河大桥斜拉桥结构地震反应分析[J].西安建筑科技大学学报(自然科学版),2000,32(4): 329-333.
- BAI Guoliang, SHI Qingxuan, YANG Yinghua, et al. Analyses on seismic response of the main bridge structure over the Weihe River in Xianyang[J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology, 2000, 32(4): 329-333.