

DOI: 10.16799/j.cnki.esdqyfh.240845

双层钢桁架斜交梁桥力学特性研究

周云岗, 艾伏平, 张 伟

[上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海市 200092]

摘 要: 为了分析双层钢桁架斜交梁桥的受力特点,建立了斜交角为 0° 、 10° 、 20° 、 30° 、 40° 、 50° 和 60° 的钢桁架梁整体有限元分析模型。对比研究了双层钢桁架梁的静力特性、静力稳定性和动力特性。研究结果表明:斜交角增大时,钢桁架梁上弦杆、下弦杆和腹杆受力普遍增大;斜交角由 0° 增加至 60° 时,杆件轴力增加不超过20%,面内弯矩增加50%~203%;斜交角小于 20° 时,腹杆、上弦杆和下弦杆恒、活载轴力变化基本普遍小于5%,面内弯矩普遍小于10%;斜交角增大时,双层钢桁架梁整体稳定性降低小于4%;斜交角增大时,结构自振频率和整体刚度减小;斜交角小于 50° 时,结构自振频率减小不超过2.4%。

关键词: 桥梁工程;梁桥;双层桥梁;钢桁架;斜交桥;力学特性

中图分类号: U448.225

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2025)07-0117-06

Study on Mechanical Characteristics of Double-deck Steel Truss Skew-beam Bridge

ZHOU Yungang, AI Fuping, ZHANG Wei

[Shanghai Municipal Engineering Design Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200092, China]

Abstract: In order to analyze the mechanical characters of double-deck steel truss skew-beam bridge, the overall finite element analysis models of steel truss beams with skew angles of 0° , 10° , 20° , 30° , 40° , 50° and 60° are established. The static characteristics, static stability and dynamic characteristic of double-deck steel truss beam are compared and studied. The research results show that when the skew angle increases, the forces on the upper chord bar, lower chord bar and web bar of the steel truss beam generally increase. When the skew angle increase from 0° to 60° , the increase in the axial force of the bars shall not exceed 20%, but the in-plane bending moment increases by 50% to 203%. When the skew angle is less than 20° , the changes in the constant and live axial forces of the web bar, upper chord bar and lower chord bar are basically generally less than 5%, and the in-plane bending moment is generally less than 10%. When the skew angle increases, the overall stability of the double-deck steel truss beam decreases by less than 4%. When the skew angle increases, the natural frequency of the structure and the overall stiffness decrease. And when the skew angle is less than 50° , the natural frequency of the structure decreases by no more than 2.4%.

Keywords: bridge engineering; beam bridge; double-deck bridge; steel truss; skew bridge; mechanical properties

0 引 言

钢桁架梁由主桁、联结系和桥面系组成。其中,主桁各杆件主要承受轴力作用,与钢板梁、钢箱梁相比,用钢量不随跨径的增大而大幅增加,在大跨度桥梁中经济性能突出^[1]。大跨度钢桁梁的桥面系采用自重轻、整体性能好、噪声小的整体钢桥面结构^[2,3]。

已建桥梁的钢桁架梁基本均采用正交结构,如闵浦大桥^[4]、闵浦二桥^[5]、南京大胜关^[6]、上海龙华

港桥^[7]、新疆五河大桥^[8]等。正交设计时,钢桁架梁对称受力,构造简单,有利于标准化设计和加工,节约投资;斜交设计时,桁架受力和构造均较复杂,当采用参与桁架受力的整体桥面系更加显著,同时桥面横梁斜交布置会造成构造困难,且横梁长度增加引起受力和柔度变大。斜交钢桁架梁在工程实践中应用较少,理论研究成果也相对较少。

交通线路规划时,路线与河道或现状道路斜交不可避免,将桥梁斜交布置,虽然会使结构受力欠佳、施工难度加大,但可取得较佳的经济效益,仍具较强竞争力^[9]。为此,开展双层钢桁架斜交梁桥的力学特性研究,对其斜交角进行参数分析,对比研究结构的静力特性、静力稳定性、动力特性等。

收稿日期: 2024-08-08

基金项目: 上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司科研项目(K2019K069)

作者简介: 周云岗(1980—),男,工学博士,高级工程师,从事大跨度桥梁设计理论研究工作。

1 工程概况

1.1 工程背景

为满足交通功能需求,青浦大道跨淀浦河大桥采用双层钢桁架梁桥,跨径组合为(67+86+67)m,上层桥宽24.6 m,下层桥宽35.75 m。技术标准为城市主干路,上层为双向6车道布置,下层为双向4车道布置。

根据道路平面布置,淀浦河大桥纵轴线与河道中心线斜交,斜交角约 18° ,桥位平面如图1所示。

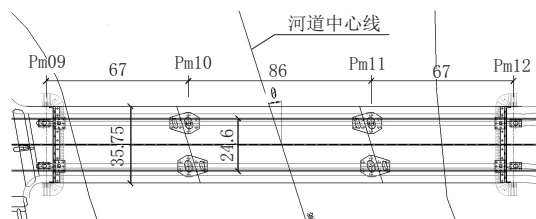


图1 桥位平面图(单位:m)

桥梁在水中设墩,桥墩轴线应与水流方向一致,斜交成为必然。钢桁架梁斜交布置时,斜交角是影响结构静力、动力和稳定性的关键参数,取斜交角 θ 值为 0° 、 10° 、 20° 、 30° 、 40° 、 50° 和 60° 比较研究钢桁架梁的力学特性。

1.2 计算荷载

桥梁设计采用的代表作用包括结构自重、汽车荷载、人群荷载、整体温度、梯度作用等,计算取值如下:

(1)结构自重:包括一期恒载、二期恒载,按材料容重取值;

(2)汽车荷载:城—A级;

(3)人群荷载:按《城市桥梁设计规范》(CJJ 11—2011)(2019年版)取值;

(4)整体温度:整体升降温 30°C ;

(5)梯度温度:按英国标准BS5400取值。

1.3 设计方案

大桥采用双层钢桁架连续梁,整幅布置,上层桥宽24.6 m,下层桥宽35.75 m,跨径组合为(67+86+67)m,桥长为220 m;下层桥为(61+86+61)m,桥长为211 m,桥梁总体布置如图2所示。

主桁架采用三角形桁架,标准节间长度12 m,腹杆倾角 $50^\circ\sim 62^\circ$ 。钢桁架梁的上、下弦立面线形根据道路纵断面确定,边支点处钢桁架高为9.88、10.57 m,中支点处钢桁架高为9.10、9.06 m,跨中处钢桁架高为度8.6 m,桁架高跨比为1/10。

钢桁架上、下弦杆采用箱型断面,截面尺寸为 $1.2\text{ m}\times 1.4\text{ m}$ (宽度 $\times$ 高度);腹杆在支点处采用箱型,截面尺寸为 $1.2\text{ m}\times 1.2\text{ m}$ (宽度 $\times$ 高度),其余均采用王

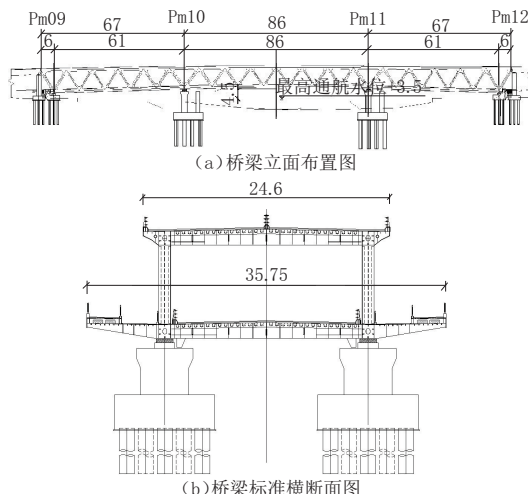


图2 桥梁立面布置图(单位:m)

字形,截面尺寸包含 $1.0\text{ m}\times 1.2\text{ m}$ 和 $0.7\text{ m}\times 1.2\text{ m}$ (翼板宽 $\times$ 腹板高)两种。

桥面系为纵横梁体系,横梁在桁架节点处采用槽型断面,截面尺寸为 $1.0\text{ m}\times 1.4\text{ m}\sim 1.603\text{ m}$ (宽度 $\times$ 腹板高),其余位置采用倒T型断面,截面尺寸为 $0.3\text{ m}\times 1.40\text{ m}\sim 1.603\text{ m}$ (翼板宽 $\times$ 腹板高);桥梁结构中心线处设置一道纵梁,倒T型断面,截面尺寸为 $0.3\text{ m}\times 1.603\text{ m}$ (翼板宽 $\times$ 腹板高)。

2 有限元模型

采用有限元软件MIDAS Civil 2022建立全桥空间分析模型。考虑到本工程钢桁架桥梁采用整体桥面结构,桥面系参与分担钢桁架受力,模型中精细化模拟钢桥面板、纵梁和横梁等桥面结构构件^[10-13],即钢桥面板采用平面应力单元,纵梁采用倒T型梁单元,横梁采用倒T型或槽型梁单元。

桥梁斜交时,计算模型中,两片主桁架结构布置不变,根据斜交角将两片主桁架在纵桥向错开设置,桥面系横梁与主桁架交点随桁架移动,形成斜交桁架桥梁分析模型。

正交桥梁计算模型如图3所示,采用梁单元模拟桁架上弦杆、下弦杆及腹杆;采用平面应力单元模拟桥面系的钢桥面板,梁单元模拟纵横梁。有限元模型共有6 584个节点,3 028个梁单元,4 208个平面应力单元。



图3 双层钢桁架梁桥有限元分析模型

根据《公路钢结构桥梁设计规范》(JTG D64—2015),钢材弹性模量为 $2.06\times 10^5\text{ MPa}$,剪切模量为

0.79×10⁵ MPa,泊松比为0.31。

3 力学性能

钢桁架梁桥主要受力构件包括桁架的上弦杆、下弦杆、腹杆及桥面系的纵梁、横梁等。桁架斜交时,这些杆件表现出不同的力学特性。文中以正交桁架梁为基准对象,比较分析不同斜交角桁架梁设计方案的静力特性、稳定性和动力特性。

3.1 静力特性

限于篇幅,静力特性研究仅考虑影响显著的恒载和汽车荷载,构件仅考虑同类型受力最不利杆件,构件内力响应仅考虑控制设计的轴向力和桁架平面内弯矩。

根据计算结果,双层钢桁架梁受力最不利杆件位置如图4示。杆件受力较大位置为边支点、中支点和1/4跨中等区域附近。对应杆件编号如图4所示。

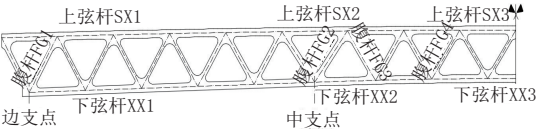


图4 钢桁架最不利杆件位置图

钢桁架的斜交角 θ 由0°增加至60°时,钢桁架腹杆恒载内力随之增大,如图5所示。

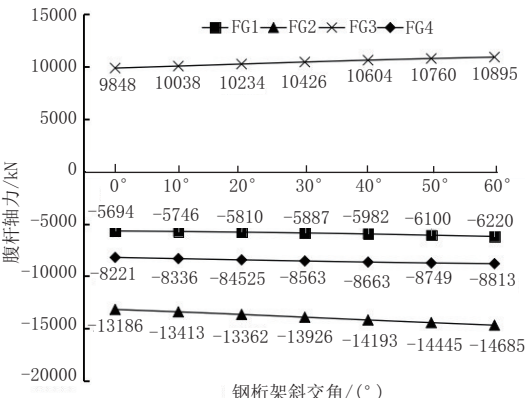
由腹杆恒载轴力图5(a)可知, θ 增大时,腹杆恒载轴力随之增大。斜交角 θ 为10°、20°、30°、40°、50°和60°时,腹杆轴力最大依次增加约2%、4%、6%、8%、10%和11%。当 $\theta \leq 20^\circ$ 时,腹杆恒载轴力增加不超过5%。

由腹杆恒载面内弯矩图5(b)可知, θ 增大时,腹杆恒载面内弯矩显著增大。斜交角 θ 为10°、20°、30°、40°、50°和60°时,腹杆面内弯矩最大依次增加约40%、84%、128%、170%、205%和231%。可见, θ 对腹杆的面内弯矩影响较大,对压弯杆件的整体稳定产生不利影响。

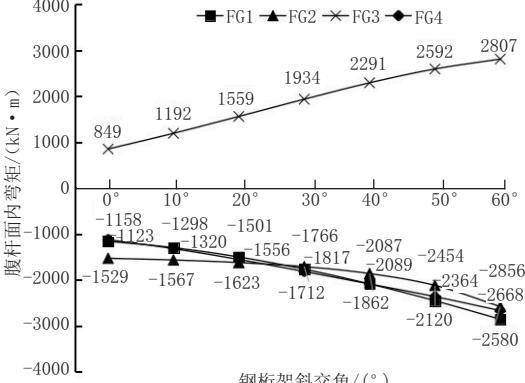
钢桁架的斜交角 θ 由0°增加至60°时,钢桁架腹杆活载轴力基本不变,而活载面内弯矩随之增大,如图6所示。

由腹杆活载轴力图6(a)可知, θ 增大时,腹杆活载轴力变化不超过1%。可见,斜交角对腹杆活载轴力无影响。

由腹杆活载面内弯矩图6(b)可知, θ 增大时,腹杆活载面内弯矩显著增大。斜交角 θ 为10°、20°、30°、40°、50°和60°时,腹杆面内弯矩最大依次增加约

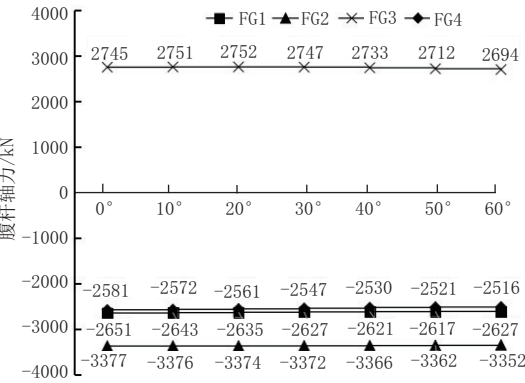


(a) 腹杆恒载轴力图

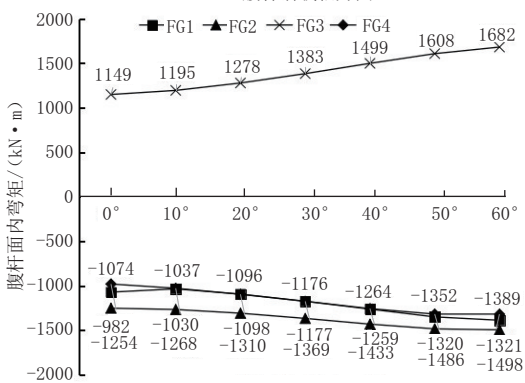


(b) 腹杆恒载面内弯矩图

图5 斜交钢桁架腹杆恒载内力图



(a) 腹杆活载轴力图



(b) 腹杆活载面内弯矩图

图6 斜交钢桁架腹杆活载内力图

4%、11%、20%、30%、40%和46%。当 $\theta \leq 20^\circ$ 时,腹杆活载面内弯矩增大不超过10%。

钢桁架的斜交角 θ 由 0° 增加至 60° 时,钢桁架上弦杆恒载内力随之增大,如图7所示。

由上弦杆恒载轴力图7(a)可知,斜交角 θ 为 10° 、 20° 、 30° 、 40° 、 50° 和 60° 时,上弦杆恒载轴力依次最大增加约1%、0%、2%、6%、14%和30%。当 $\theta \leq 20^\circ$ 时,上弦杆恒载轴力增加不超过5%。

由上弦杆恒载面内弯矩图7(b)可知, θ 增大时,上弦杆恒载面内弯矩显著增加。斜交角 θ 为 10° 、 20° 、 30° 、 40° 、 50° 和 60° 时,上弦杆面内弯矩最大依次增加约4%、12%、28%、57%、108%和204%。可见, θ 增大引起上弦杆的面内弯矩增大,且增大显著。

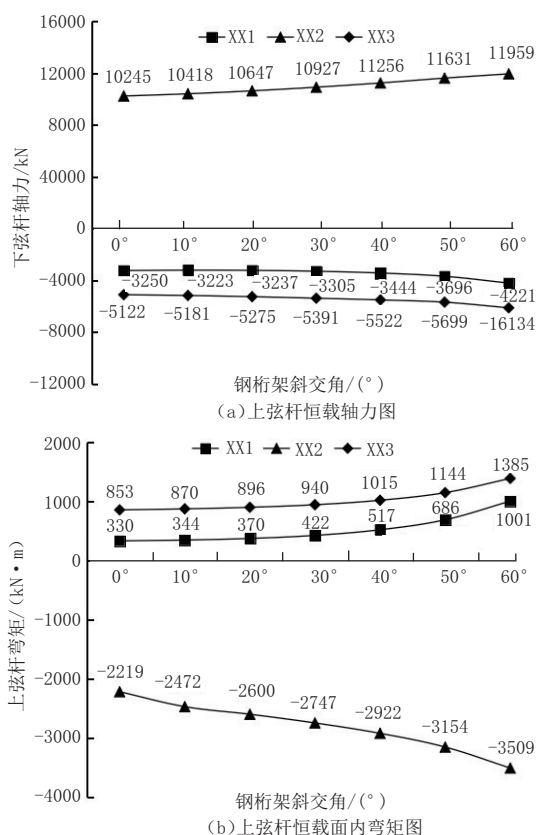


图7 斜交钢桁架上弦杆恒载内力图

钢桁架的斜交角 θ 由 0° 增加至 60° 时,钢桁架上弦杆活载轴力基本不变,而活载面内弯矩增加,如图8所示。

由上弦杆活载轴力图8(a)可知, θ 增大时,上弦杆活载轴力变化不超过10%。当 $\theta \leq 20^\circ$ 时,活载轴力变化不超过2%。可见, θ 对上弦杆活载轴力影响较小。

由上弦杆活载面内弯矩图8(b)可知, θ 增大时,上弦杆活载面内弯矩增大较大。斜交角 θ 为 10° 、 20° 、 30° 、 40° 、 50° 和 60° 时,上弦杆面内弯矩最大依次增加约1%、2%、4%、7%、12%和20%。当 $\theta \leq 20^\circ$ 时,上弦杆活载面内弯矩变化不超过2%。

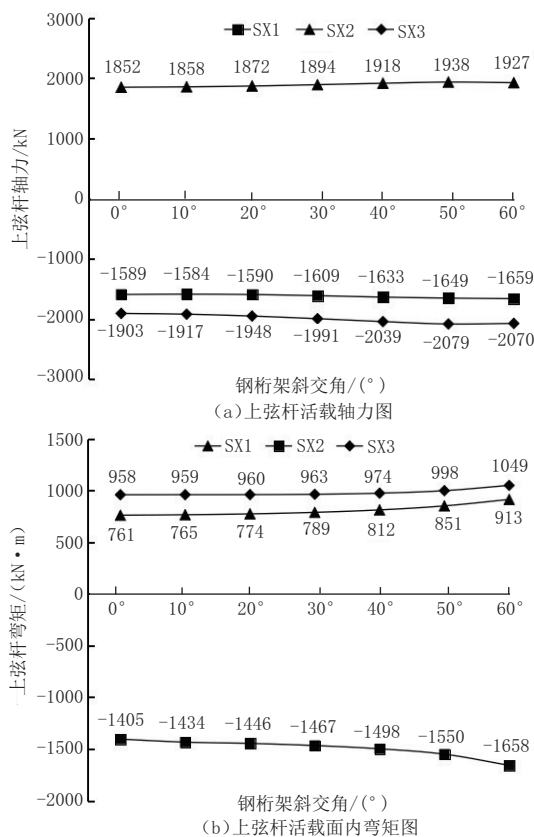


图8 斜交钢桁架上弦杆活载内力图

钢桁架的斜交角 θ 由 0° 增加至 60° 时,钢桁架下弦杆恒载轴力减小,面内弯矩增大,如图9所示。

由下弦杆恒载轴力图9(a)可知,斜交角 θ 为 10° 、 20° 、 30° 、 40° 、 50° 和 60° 时,下弦杆恒载轴力最大依次减小约1%、2%、5%、9%、14%和24%。当 $\theta \leq 20^\circ$ 时,下弦杆恒载轴力增加不超过3%。

由下弦杆恒载面内弯矩图9(b)可知, θ 增大时,下弦杆恒载面内弯矩显著增加。斜交角 θ 为 10° 、 20° 、 30° 、 40° 、 50° 和 60° 时,下弦杆面内弯矩最大依次增加约3%、5%、8%、12%、19%和35%。可见, θ 增大下弦杆的面内弯矩变化显著,对压弯杆件的整体稳定产生不利影响。

钢桁架的斜交角 θ 由 0° 增加至 60° 时,钢桁架下弦杆活载轴力略有减小,面内弯矩增大,如图10所示。

由下弦杆活载轴力图10(a)可知, θ 增大时,下弦杆XX1、XX3活载轴力减小1%~17%,下弦杆XX2活载轴力增大2%~4%。当 $\theta \leq 20^\circ$ 时,活载轴力变化不超过5%。

由下弦杆活载面内弯矩图10(b)可知, θ 增大时,下弦杆活载面内弯矩变化显著。 θ 为 10° 、 20° 、 30° 、 40° 、 50° 和 60° 时,下弦杆面内弯矩最大依次增加约4%、7%、11%、20%、30%和48%。当 $\theta \leq 20^\circ$ 时,下弦杆活载面内弯矩变化不超过8%。

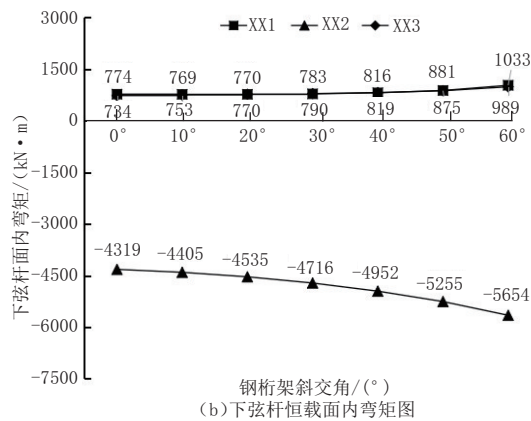
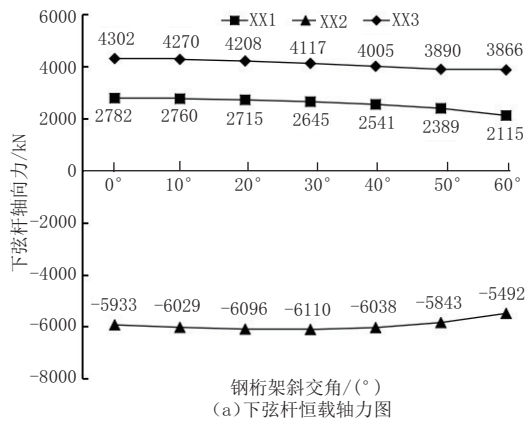


图 9 斜交钢桁架下弦杆恒载内力图

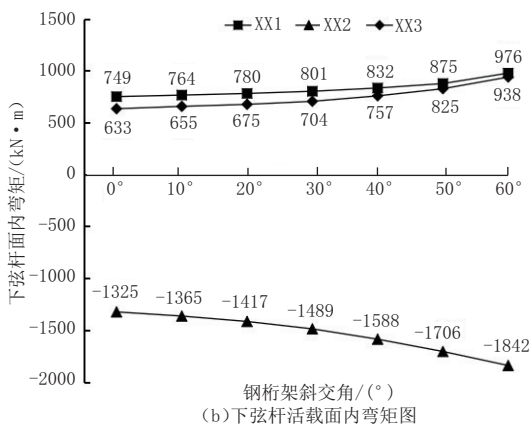
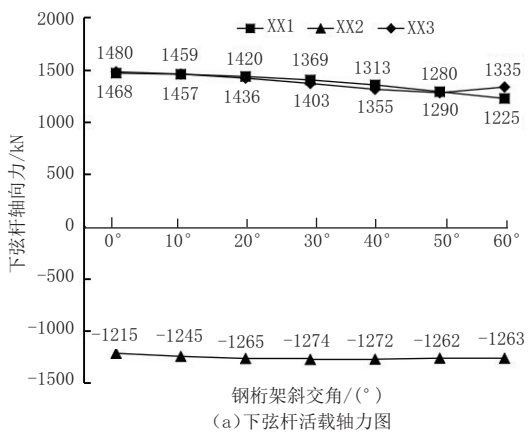


图 10 斜交钢桁架下弦杆活载内力图

上述分析表明,斜交钢桁架梁的斜交角增大时:
(1)腹杆恒载轴力略有增大,活载轴力基本不

变;腹杆恒、活载面内弯矩均显著增大;

(2)上弦杆恒、活载轴力均增大;上弦杆恒、活载面内弯矩均明显增大;

(3)下弦杆恒、活载轴力在中支点处略有增大,其余位置减小;下弦杆恒、活载面内弯矩均明显增大;

(4)斜交角 $\theta \leq 20^\circ$ 时,腹杆、上弦杆和下弦杆恒、活载轴力变化基本普遍小于5%,面内弯矩普遍小于10%。

究其原因,钢桁架梁斜交时,桥面板由正交板变为斜交板,桥面荷载沿节点间弦杆传递由对称均匀转变为偏向一端集中,产生以下影响:

(1)桁架节点面内弯矩增大,故上、下弦杆及腹杆面内弯矩显著增大;

(2)两片桁架水平力反对称传递,故上、下弦杆恒、活载轴力变化相反,即一增一减;

(3)桁架节点两侧弦杆传来的竖向力反对称变化,即一增一减,故腹杆轴力基本无变化。

2.2 静力稳定性

双层钢桁架梁桥整体失稳模态为腹杆面内失稳,如图11所示。计算表明,当作用组合为恒载+汽车+人群+横向风荷载时,双层钢桁架梁结构屈曲稳定系数最小。斜交角 θ 由 0° 增加至 60° 时,钢桁架梁整体稳定系数如图12所示。

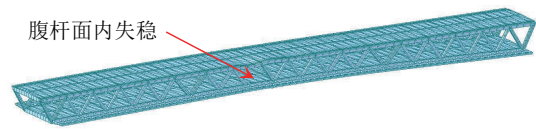


图 11 桥梁整体失稳模态

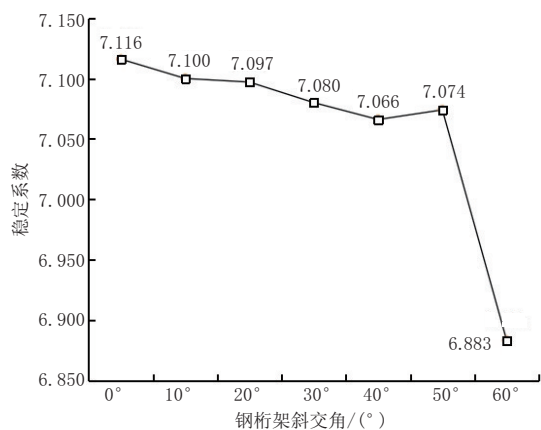


图 12 钢桁架斜交梁整体稳定系数

由图12可知,钢桁架梁斜交角度增大时,结构整体稳定性降低。这是因为斜交角增大时,腹杆面内弯矩增大,引起其稳定性下降。斜交角由 0° 递增至 50° 时,整体稳定系数减小0.04%~0.70%,增加至 60° ,稳定系数减小3.27%。可见,斜交角增大时,钢桁架梁整体稳定性略有降低。总体而言,斜交角对结构

稳定影响较小。

3.3 动力特性

双层钢桁架梁桥前两阶动力模态为一阶竖弯和一阶横弯,其动力模态分别如图13、图14所示。

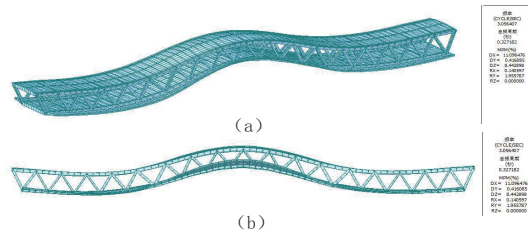


图13 桥梁一阶对称竖弯模态

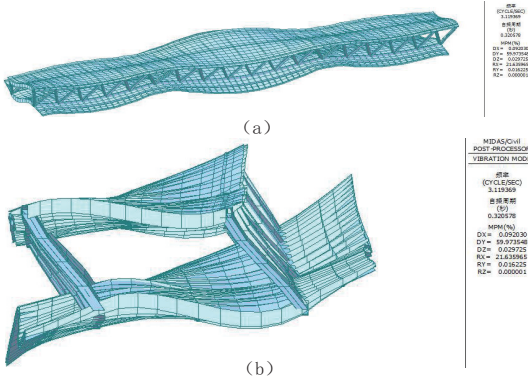


图14 桥梁一阶对称横弯模态

双层钢桁架梁斜交角度由0°递增至60°时,双层钢桁架梁的自振频率和振动模态如表1所列。

表1 钢桁架斜交梁自振频率和振动模态表 单位:Hz

斜交角	动力特性					
	一阶		二阶		三阶	
	频率	振型	频率	振型	频率	振型
0°	3.057	对称竖弯	3.119	对称横向	3.651	反对称横向
10°	3.055	对称竖弯	3.091	对称横向	3.612	反对称横向
20°	2.997	对称横向	3.048	对称竖弯	3.512	反对称横向
30°	2.829	对称横向	3.033	对称竖弯	3.345	反对称横向
40°	2.572	对称横向	3.002	对称竖弯	3.100	反对称横向
50°	2.202	对称横向	2.754	反对称横向	2.930	对称竖弯
60°	1.693	对称横向	2.297	反对称横向	2.712	对称竖弯

由表1可知,双层钢桁架梁斜交角度增大时,其第一阶振动模态由对称竖弯转变为对称横弯,表明随着斜交角增大,双层钢桁梁横向框架刚度减小。究其原因,桁架斜交时,横梁长度增加,抗弯刚度下降,使钢桁架梁横断面框架刚度减小,引起结构第一阶振动模态变化。

斜交角度由0°递增至60°时,双层钢桁架梁对称竖弯自振频率依次减小0.1%、0.2%、0.5%、1.0%、2.4%、7.4%,这是因为斜交角越大,结构整体刚度越

小,自振频率降低越大。

4 结 语

随着斜交角增大,钢桁架梁上弦杆、下弦杆和腹杆受力普遍增大,结构刚度、自振频率和静力稳定性略有下降,主要力学特征如下。

(1)斜交角增大时,钢桁架梁上弦杆、下弦杆和腹杆受力普遍增大。斜交角由0°增加至60°时,轴力增加不超过20%,面内弯矩增加50%~203%;

(2)斜交角 $\theta\leq 20^\circ$ 时,腹杆、上弦杆和下弦杆恒、活载轴力变化基本普遍小于5%,面内弯矩普遍小于10%。由于小角度斜交对施工影响较小,当斜交不可避免时,可考虑采用小角度斜交钢桁架梁桥。

(3)斜交角增大时,双层钢桁架梁整体稳定性略有降低,最大不超过4%。斜交角大于20°时,结构整体稳定性系数基本不变;

(4)斜交角增大时,双层钢桁架前两阶动力模态由一阶竖弯转变为一阶横弯,结构横断面框架刚度减小。斜交角 $\theta\leq 50^\circ$ 时,结构自振频率降低不超过2.4%。

参考文献:

[1] 邵长宇.梁式组合结构桥梁[M].北京:中国建筑工业出版社,2016.

[2] 常付平,蒋彦征,李鹏.结合钢桁梁正交异性钢桥面板体系研究[J].桥梁建设,2011(6):37-41.

[3] 侯文崎,叶梅新.南京大胜关长江大桥三主桁钢正交异性板整体桥面结构受力特性的试验研究[J].铁道科学与工程学报,2008,5(3):11-17.

[4] 马磊,吴青峰,黄国斌,等.大跨度双层公路斜拉桥建设关键技术研究[R].上海:上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司,2010.

[5] 周良,彭俊,邓玮琳,等.闵浦二桥公轨两用双层主桥的设计及关键技术[J].中国市政工程,2008(增刊1):21-24.

[6] 易伦雄.南京大胜关长江大桥大跨度钢桁拱桥设计研究[J].桥梁建设,2009(5):1-5.

[7] 蒋彦征,常付平,岳贵平.丰溪路龙华港桥设计[J].城市道桥与防洪,2010(9):142-145.

[8] 任宏业,蔚志鹏.乌昌大道头屯河大桥总体设计[J].城市道桥与防洪,2019(3):87-90.

[9] 张谢东,周莉,耿波.斜交连续梁桥数值分析研究[J].计算力学学报,2004,21(4):502-505.

[10] 刘桂红,易伦雄.采用正交异性钢桥面板的铁路钢桁梁设计[J].桥梁建设,2007(增刊2):8-10.

[11] 任巍峰.高速铁路系杆拱桥整体钢桥面计算方法及模型试验研究[D].成都:西南交通大学,2010.

[12] 乔雷涛.高速铁路正交异性板钢桁梁整体计算模式及方法研究[J].铁道标准设计,2020,64(5):83-88.

[13] 张敏,叶梅新,张晔芝.密布横梁正交异性板整体桥面受力行为[J].中国铁道科学,2010,31(3):28-34.