

敞开式钢桁架桥设计及整体稳定参数分析

杨昌荣

(上海市市政规划设计研究院有限公司, 上海市 200030)

摘要: 敞开式桁架桥行车视野较好, 整体造型较为美观, 但上弦杆易发生面外失稳, 其稳定问题为设计的关键因素。结合工程实例, 采用有限元方法对长虹路钢桁架桥进行计算分析, 结果表明该桥的刚度、强度、稳定、抗疲劳等均满足规范要求。为探讨敞开式钢桁架整体稳定的影响参数, 对该桥构件尺寸及斜交角进行调整, 通过调整各杆件刚度建立对照模型, 发现上弦杆、腹杆等构件的横向刚度影响较大; 通过与非敞开式桁架对比分析, 验证敞开式桁架桥的技术可行性。

关键词: 敞开式桁架桥; 桥梁设计; 整体稳定; 参数分析; 横向刚度; 撑杆

中图分类号: U448.21+1; TU997

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2026)02-0200-06

Design of Open-truss Steel Bridge and Parametric Analysis of Overall Stability

YANG Changrong

(Shanghai Municipal Planning Design Institute Co., Ltd., Shanghai 200030, China)

Abstract: Open truss bridge offers a good view for vehicles and has a relatively beautiful overall shape, but the top chords are prone to out-of-plane instability, and its stability is the key factor of design. Combined with the engineering examples, the finite element method is used to calculate and analyze a steel truss bridge on Changhong Road. The result shows that the stiffness, strength, stability and fatigue resistance of the bridge all meet the code requirements. To explore the parameters influencing the overall stability of open-steel trusses, the component dimensions and skew angles of the bridge should be adjusted. By adjusting the stiffness of individual members to establish the contrast model, it is found that the lateral stiffness of components such as the top chords and web members has a significant influence. Through the comparative analysis on the non-open truss bridges, the technical feasibility of open-truss bridges is validated.

Keywords: open-truss bridge; bridge design; overall stability; parametric analysis; lateral stiffness; brace rod

0 引言

针对敞开式桁架的稳定问题, 李国豪先生将腹杆对上弦杆的约束用均匀分布的弹性支撑代替以简化计算^[1], 规范上则采用抛物线形的弹性支撑模拟^[2]。

敞开式桁架结构形式较为新颖, 对此类桥梁的研究较少。岳子翔等学者^[3-6]基于折线形轴力分布的假定, 推导出上弦杆面外屈曲及桁架抗扭惯性矩的计算公式, 提出结构的横向抗弯刚度和抗扭刚度共同影响整体稳定性能; 工程上可通过增加宽跨比、侧向约束及横向联系等措施来提高稳定性。

为增加结构的横向稳定性, 螺溪洲大桥^[7-8]采用变高主桁架并在桁架高点设置横向联系, 腹杆采用米字和K字型布置以增加侧向刚度; 某运河桥^[9]则是全桥采用箱型截面腹杆, 桥面系采用整体式箱断面增加了整桥的抗扭刚度, 同时减小上弦杆的受力。

本文介绍的敞开式桁架桥位于吴淞江工程新川沙河段, 参考近年来研究成果, 建立有限元模型对该桥进行计算, 并对影响整体稳定构件的详细参数进行比对分析。

1 概述

新川沙河为规划IV级航道, 规划河口宽96 m, 通航净宽68 m。长虹路道路等级为城市支路, 上跨该航道新建敞开式钢桁架桥, 主桥桥长123 m, 跨径121 m, 桥梁设计荷载为城-B级。桥梁横断面布置

收稿日期: 2025-06-19

作者简介: 杨昌荣(1992—), 男, 硕士, 工程师, 从事桥梁设计工作。

为0.25 m(护栏)+3.5 m(人非道)+0.25 m(护栏)+1.75 m(主桁区)+0.5 m(防撞护栏)+7.5 m(机动车道)+0.5 m(防撞护栏)+1.75 m(主桁区)+0.25 m(护栏)+3.5 m(人非道)+0.25 m(护栏)=20 m。下部结构采用V型桥墩,钻孔灌注桩。该桥目前已竣工验收,主桥立面见图1。



图1 主桥立面实景图

2 结构设计

2.1 主桁架

主桁架采用两侧对称的鱼腹式钢桁架。如图2所示,主桁标准节间距11 m,桁架外形为拱形,拱轴线为二次抛物线,跨中桁高6.5 m,矢跨比为1/18.6。上弦杆内横隔板标准间距为2.75 m,下弦杆内横隔板标准间距为3.65 m和3.7 m。

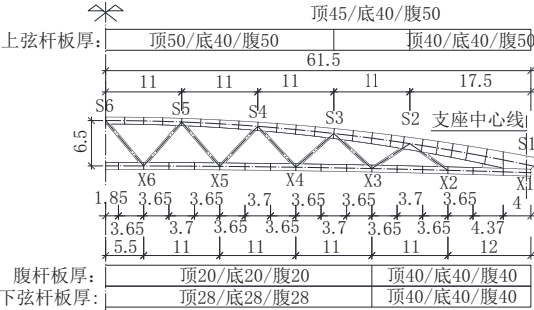


图2 主桁架半立面布置图(单位:m)

上弦杆为变高梯形截面,顶宽1 750 mm,腹板斜率1:8。下弦杆为1 050 mm×1 000 mm的矩形截面。腹杆采用400 mm×400 mm的工字型截面。上弦杆跨中S4S5、S5S5'节段钢材采用Q420qD,其余均采用Q345qD。主桁架杆件构造示意图见图3。

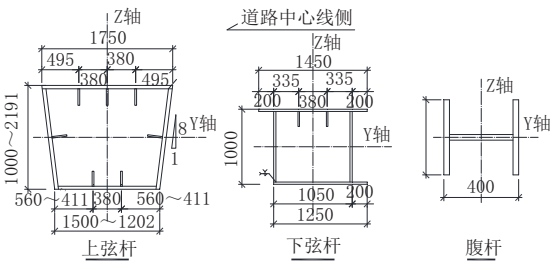


图3 主桁架杆件构造示意图(单位:mm)

各杆件板厚及截面惯性矩见表1。

表1 各杆件截面板厚及惯性矩汇总表						
杆件	位置	顶板	腹板	底板	I_{yy}/mm^4	I_{zz}/mm^4
		板厚/ mm	板厚/ mm	板厚/ mm		
上弦杆	跨中位置	50	50	40	3.93E+10	9.03E+10
	支点附近	40	50	40	2.14E+11	1.33E+11
下弦杆	跨中位置	28	28	28	1.78E+10	1.92E+10
	支点附近	40	40	40	2.98E+10	3.22E+10
腹杆	中腹杆	20	20	20	2.14E+08	6.56E+08
	端腹杆	40	40	40	4.28E+08	1.15E+09

2.2 桥面系

如图4所示,桥面系采用正交异性钢桥面板,标准横梁间距为3.65 m和3.7 m,与下弦杆横隔板对应;中横梁采用倒T形截面,端横梁采用箱形截面。钢桥面板厚16 mm,机动车道范围内桥面板纵向加劲为U型肋和一字肋。人非道范围内桥面板纵向加劲为一字肋。

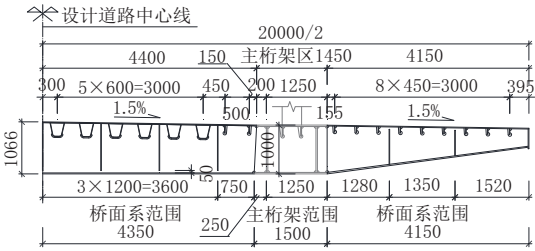


图4 桥面系构造示意图(单位:mm)

2.3 结构特点

主桥结构为敞开式桁架桥,有以下特点:上弦杆间无横向联系,容易失稳;矢跨比较小,拱内力弯矩占比较大,杆件应力水平高。

在设计时,围绕以上问题进行:增加上弦杆横向宽度,以提高横向抗弯刚度;增加上下弦交汇处截面尺寸及板厚,增加端腹杆板厚,同时端横梁采用箱型截面,提高整体抗扭刚度;考虑剪力滞和局部稳定影响后,对构件强度和整体稳定进行验算,针对部分强度验算难以满足的构件,增加其钢材牌号。

基于以上结构特点和分析原则,对桥梁结构进行计算。

3 计算分析

3.1 计算模型

采用MIDAS Civil 2019建立全桥模型,杆件均采用梁单元模拟,桥面板采用板单元模拟,板梁间为刚性连接,结构边界按实际情况施加约束。主桥有限元计算模型见图5。

3.2 静力分析

机动车活载挠度为48.5 mm,人群活载挠度为

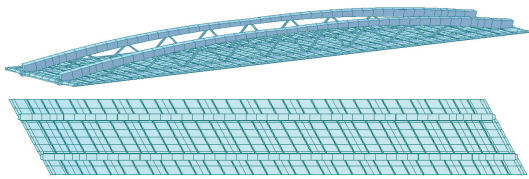


图5 主桥有限元模型

24.3 mm。机动车+人群活载竖向挠度为 95.8 mm= $L/1263$ 。

基本组合下,上弦杆均受压,下弦杆均受拉,应力分布情况见表 2,其中,各杆件最大剪应力为 47.3 MPa,出现在桥面横梁位置。

表2 基本组合杆件正应力汇总表(拉为正压为负)

杆件	位置	最大正应力/ MPa	应力限值/ MPa	最大应力位置
上弦杆	上缘	-205.7	270	端腹杆与上弦交汇处
	下缘	-144.3	320	跨中附近
下弦杆	上缘	154.7	270	跨中附近
	下缘	209.7	270	跨中附近
腹杆	上缘	241.4/-172.5	270	第一根/第二根腹杆
	下缘	242.5/-174.5	270	第一根/第二根腹杆
横梁	上缘	215.5/-163.9	270	横梁与下弦交汇处/ 横梁跨中
	下缘	175.6/-165.2	270	横梁跨中/横梁与下 弦交汇处

3.3 动力特性分析

自振频率反映桥梁的固有特性,结构前六阶自振频率及振型分别为:反对称侧弯($f=0.870$ Hz)、正对称竖弯($f=1.024$ Hz)、反对称侧弯($f=1.466$ Hz)、纵向拉伸+反对称侧弯($f=1.502$ Hz)、正对称侧弯($f=1.754$ Hz)、反对称侧弯+侧向扭转($f=1.975$ Hz)。由于本桥为机动车桥,不需要考虑人行共振问题。人非桥时,则需采取相应措施控制振动频率,以达到人行舒适度标准。

3.4 整体稳定分析

敞开式桁架桥横向刚度及抗扭刚度较弱,整体失稳问题对桥梁设计至关重要。本文通过 MIDAS 建立有限元模型,采用子空间迭代法分析结构的屈曲稳定,求取线性系统刚度矩阵的特征值,即为整体稳定系数^[9-10]。

对 3 种工况下的整体稳定进行分析:工况一,恒载+百年风;工况二,恒载+运营风+单车道偏载+单侧人非活载偏载;工况三,恒载+运营风+双车道满载+双侧人非活载满载。

如表 3 所示,机非活载满载工况下,结构稳定系数最小,数值为 7.82。三种工况下,稳定系数均大于

4,满足整体稳定的要求。

表3 3种工况下整体失稳汇总表

工况	整体稳定系数	失稳模式
工况一	10.50	面外反对称失稳
工况二	8.64	面外反对称失稳
工况三	7.82	面外反对称失稳

3.5 构件强度和稳定验算

由于剪力滞的影响,截面应力分布不均匀。薄壁结构受压时容易发生局部屈曲,不能用全截面承载。通常采用有效截面的简化方法,计算剪力滞和局部稳定的影响^[10]。考虑整体稳定折减时,采用有限元方法计算折减系数。

同时考虑剪力滞、局部稳定的有效宽度及整体稳定的折减后,选取最大轴力 N_d (工况一)、最大弯矩 M_y (工况二)、最大弯矩 M_z (工况三)共 3 种工况对各杆件强度和整体稳定进行验算。

表 4 和表 5 中汇总以上弦杆为例,结果表明,构件的强度和整体稳定均满足要求。

表4 上弦杆各节段构件强度验算(不大于 1)

节段号	上翼缘			下翼缘		
	工况一	工况二	工况三	工况一	工况二	工况三
S1S2	0.770	0.957	0.846	0.224	0.406	0.085
S2S3	0.727	0.801	0.767	0.268	0.050	0.018
S3S4	0.813	0.747	0.749	0.548	0.257	0.268
S4S5	0.769	0.683	0.658	0.534	0.283	0.338
S5S5'	0.765	0.737	0.732	0.578	0.277	0.283

表5 上弦杆各节段压弯构件稳定验算(不大于 1)

节段号	验算位置	工况一	工况二	工况三
S1S2	面内	0.789	0.982	0.871
	面外	0.817	0.998	0.892
S2S3	面内	0.772	0.846	0.809
	面外	0.860	0.911	0.874
S3S4	面内	0.864	0.793	0.796
	面外	0.984	0.879	0.882
S4S5	面内	0.833	0.734	0.710
	面外	0.979	0.843	0.818
S5S5'	面内	0.830	0.793	0.789
	面外	0.978	0.906	0.901

3.6 抗疲劳验算

承受汽车荷载的构件与连接,按疲劳细节类别进行疲劳验算。采用疲劳荷载模型 I,对腹杆对接焊缝(位置 1)进行验算;采用疲劳荷载模型 III,对桥面板横梁腹板开孔间最不利截面(位置 2)、纵肋通过横梁且纵肋下方挖孔位置(位置 3)、桥面盖板与 U 肋连接处(位置 4)进行验算。疲劳模型 III 验算时,选取 5 个横向区域($\omega 1 \sim \omega 5$)加载。

表6中结果表明,所选4个位置的疲劳验算均满足规范要求。其中,桥面板疲劳5个横向加载位置平均应力幅按规范方法^[10]计算所得。

表6 疲劳验算结果汇总表					
单位:MPa					
类别	腹杆疲劳 (模型I)	桥面板疲劳(模型III)			
	位置1	横向区域	位置2	位置3	位置4
应力幅	27.80	$\omega 1$	55.87	32.09	21.69
		$\omega 2$	50.65	31.11	20.40
		$\omega 3$	60.43	32.00	19.84
		$\omega 4$	43.66	30.22	17.25
		$\omega 5$	60.42	31.25	27.14
等效常值 应力幅	37.53	区域平均	63.90	36.48	24.61
疲劳细节 类别	70	/	70	70	70

5 整体稳定参数影响分析

5.1 简化分析模型

为探讨不同参数对敞开式桁架整体稳定的影响,在计算模型中对各杆件的刚度进行调整。调整原模型中杆件尺寸及斜交角,用作初始简化分析模型,见图6。

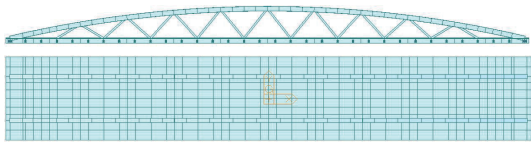


图6 简化分析模型

将上弦杆横向抗弯刚度记为A,其中A的数值为 $1.415\times 10^{-2}\text{ m}^4$,各杆件初始尺寸及刚度见表6。

表6 初始模型中各杆件尺寸及刚度汇总表					
构件	截面类型	宽/mm	高/mm	竖向抗弯刚度	横向抗弯刚度
上弦杆	矩形	1 000	1 000	A	A
下弦杆	矩形	1 000	1 000	A	A
腹杆	工字形	400	400	0.02A	0.06A
端横梁	矩形	1 000	1 000	A	A
中横梁	倒T形	400	1 000	0.41A	0.02A

本章的整体稳定采用4.2节中的方法分析,分析工况取工况三。初始模型的屈曲系数记为 μ ,临界屈曲力记为F,主桁钢材数量记为Q。

5.2 杆件刚度对整体稳定的影响分析

根据分析结果,横梁、下弦杆的竖向和横向刚度,以及上弦杆、腹杆的竖向刚度对整体稳定的影响较小。调整构件尺寸,在竖向刚度不变的情况下,改变杆件的横向刚度,分析上弦杆和腹杆的横向刚度

对整体稳定的影响。

根据文献分析,类似跨径桁架桥的上弦杆和腹杆横向刚度集中在0.58~3.56A和0.03~0.66A范围内^[6,11-16]。结合工程实际,考虑本文为定性分析,上弦和腹杆的调整范围分别设定为0.38~5.211A和0.015~0.511A,以反映杆件刚度对稳定的影响趋势。

上述整体失稳均表现为上弦杆失稳。根据图7~图9,上弦杆横向刚度由0.38A增大到5.21A时,材料由0.95Q增加到1.20Q,屈曲系数和屈曲临界力分别由0.60 μ 和0.60F增大到2.12 μ 和2.19F;腹杆横向刚度由0.015A增大到0.51A时,材料由0.98Q增加到1.08Q,屈曲系数和屈曲临界力分别由0.61 μ 和0.60F增大到2.16 μ 和2.20F。通过对比分析:(1)上弦杆和腹杆的横向刚度对整体失稳影响较大;(2)相同钢材数量下,增加腹杆横向刚度,对整体稳定的提高更有效。

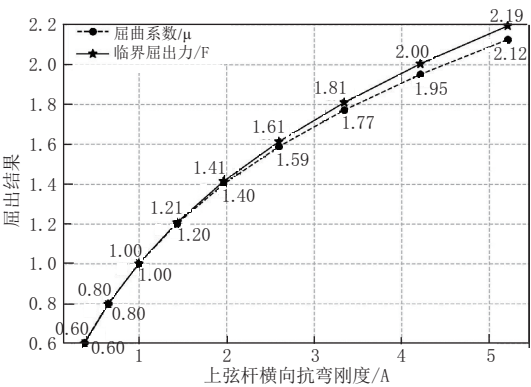


图7 整体稳定与上弦杆横向刚度关系图

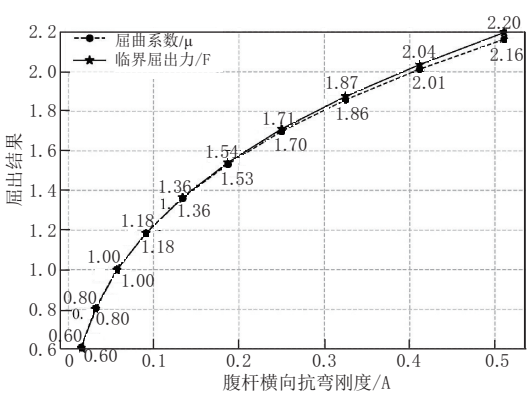


图8 整体稳定与腹杆横向刚度关系图

5.3 斜交角对整体稳定的影响分析

调整桥梁的斜交角,角度变化范围为0°~55°,分析其对整体稳定的影响,见图10。

随着斜交角增大,整体稳定呈下降趋势。但斜交角对稳定的影响较小,斜交角由0°增加到55°时,屈曲系数和屈曲临界力分别减小到0.94 μ 和0.97F。当斜交角过大时(本算例为超过45°),桥面板锐角位

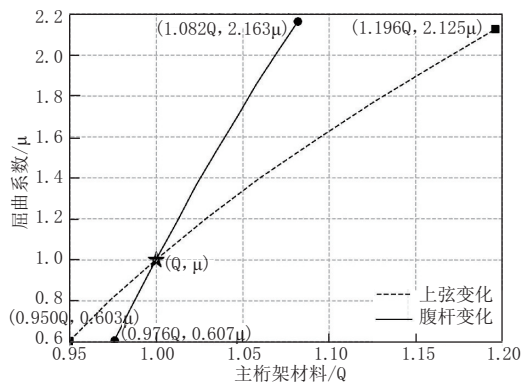
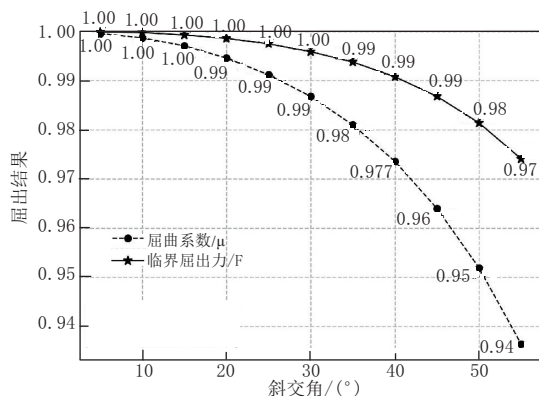
图9 屈曲系数 μ 与主桁架材料关系图

图10 整体稳定与斜交角关系图

置容易先屈曲,在设计时应着重考虑。

5.4 水平撑杆对整体稳定的影响分析

在初始分析模型的上弦杆节点位置增设水平撑杆,并改变撑杆的布置形式,分析撑杆对整体失稳的影响。撑杆初始尺寸为400 mm×400 mm工字梁,横向刚度为0.015A。有无撑杆模型的整体失稳均表现为上弦杆失稳,通过改变撑杆布置形式和横向刚度,分析撑杆对稳定的影响,本次分析仅以屈曲系数 μ 作为对比标的。

根据撑杆形式不同共分析6个模型:模型一,1根横向撑杆;模型二:3根连续横向撑杆;模型三,3根间隔横向撑杆;模型四:5根连续横向撑杆;模型五:3根横向撑杆+2根斜向撑杆;模型六:5根横向撑杆+4根斜向撑杆。撑杆布置均由跨中开始向端部延伸。

图11、图12表明:(1)对比模型二、三,上弦跨中区域的横桥向约束越大,稳定性越好;(2)对比模型四、五,斜向撑杆比横向撑杆对提高稳定性更有利;(3)通过模型五、六,增设斜向撑杆后,改变撑杆刚度对稳定性影响较小。

将5.2节中增加上弦杆和腹杆刚度的无横向水平撑杆的模型记为上弦杆模型和腹杆模型,与增设撑杆的模型五六进行对比,结果见图13。

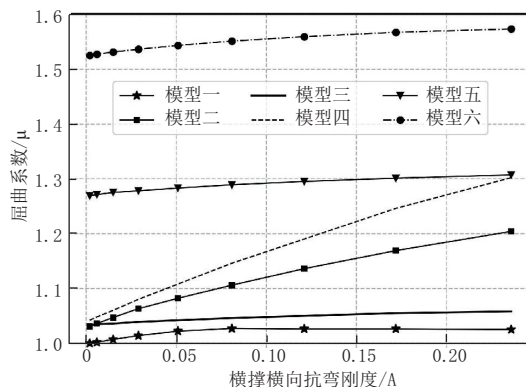
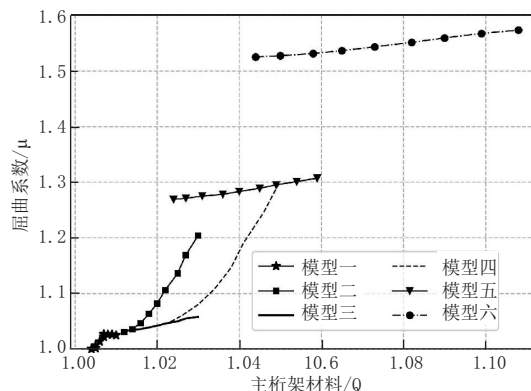
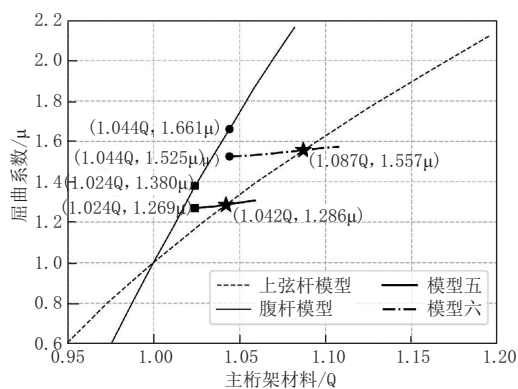
图11 屈曲系数 μ 与撑杆刚度关系图图12 屈曲系数 μ 与主桁架材料关系图

图13 无撑杆与有撑杆模型对比图

当增加的撑杆均为初始尺寸,即撑杆横向刚度为0.015A时,模型五、六的屈曲系数分别为1.269 μ 和1.512 μ ,增加相同材料的腹杆模型中相对应的屈曲系数更高,分别为1.380 μ 和1.661 μ 。此时,上弦杆模型的屈曲系数均相对较小,当材料分别增加到1.042Q和1.087Q时,上弦杆模型的屈曲系数则分别超过模型五和模型六。

有无撑杆模型对比结果可知:材料数量Q相同情况下,在构件横向刚度较小时,增设撑杆比增加腹杆和上弦杆刚度更有利于提高稳定性,随着主桁架材料的继续增加,增加腹杆和上弦杆横向刚度对提高整体稳定的效果更明显。

6 结 语

本文介绍了上跨新川沙河长虹路桥的设计要点,验算了结构的整体强度、刚度、稳定性和抗疲劳性能。并以该桥为分析对象,对敞开式桁架桥整体稳定的影响参数进行探讨。得出结论:

(1)本桥的整体强度、刚度、稳定性及抗疲劳均满足要求。

(2)上弦杆和腹杆横向刚度对敞开式桁架桥的整体稳定性起关键性作用,其中腹杆的影响相对更大。

(3)斜交角越大稳定系数越小,但斜交对整体稳定的影响不大。

(4)增设横撑和斜撑可有效增加稳定性。

(5)相较于横撑,增设斜撑对提升稳定性效果更好;斜撑和横撑的刚度对整体稳定的影响不明显。

(6)一般情况下,无撑杆的敞开式桁架的整体稳定系数低于有撑杆的桁架,但通过增加上弦杆和腹杆的横向刚度,其稳定性可以达到甚至超过同类型有撑杆的桁架。

参考文献:

[1] 李国豪.桥梁结构稳定与振动(修订版)[M].北京:中国铁道出版社,1996.

[2] TB 100091—2017,铁路桥梁钢结构设计规范[S].
 [3] 岳子翔.半开式桁架桥平面外稳定性与抗扭特性研究[D].徐州:中国矿业大学,2019.
 [4] 岳子翔,赵锐,王立晓,等.半开式桁架桥主梁抗扭特性研究[J/OL].工业建筑,1-12[2025-07-10].
 [5] 温庆杰,岳子翔,周牧,等.半开式桁架桥上弦杆平面外屈曲临界力研究[J].华中科技大学学报(自然科学版),2018,46(1):104-109.
 [6] 岳子翔,温庆杰,卓涛.半开式桁架桥结构稳定性分析[J].工程力学,2018,35(增刊1):270-277.
 [7] 刘瑜,李晨.敞开式连续钢桁架节点设计与分析——以赣州螺溪洲大桥为例[J].中国市政工程,2023(6):6-9;93.
 [8] 卢继明,郭卓明.悬索形敞开式钢桁架桥K型节点设计及研究[J].上海公路,2023(4):47-52,208-209.
 [9] 桥梁工程软件 midas Civil 使用指南[M].北京:人民交通出版社,2013.
 [10] JTG D64—2015,公路钢结构桥梁设计规范[S].
 [11] 陈岳,江军,汪东明.敞开式流线型钢桁架设计[J].上海公路,2022(3):47-51;164.
 [12] 汤秋华.大跨度变高度连续钢桁架桥设计[J].城市道桥与防洪,2020(8):94-97.
 [13] 孙林林,周浩.132 m 下承式钢桁架桥设计与施工要点[J].中国水运,2024(7):123-126.
 [14] 赵信海,段书龙.跨运河钢桁架梁桥设计参数分析[J].黑龙江交通科技,2025,48(4):72-75;80.
 [15] 黄德明.双层钢桁架连续梁桥结构设计[J].中国水运(下半月),2021,21(18):121-122.
 [16] 张二乐.下承式简支钢桁架桥结构计算分析[J].运输经理世界,2024(27):34-36.