

文章编号:1673-9469(2023)01-0041-08

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2023.01.007

斜靠式钢箱系杆拱桥成桥索力检测及稳定性分析

计静^{1,2}, 罗干^{1*}, 姜信贺³, 魏晨阳², 袁长春², 姜良芹¹, 张展彬¹

(1. 东北石油大学 黑龙江省高校防灾减灾工程与防护工程重点实验室, 黑龙江 大庆 163318; 2. 哈尔滨工业大学 土木工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150090; 3. 中铁建大桥工程局集团 第五工程有限公司, 四川 成都 610500)

摘要: 为研究斜靠式钢箱系杆拱桥(5片拱肋)的稳定性, 依托引江济淮工程下承式斜靠拱桥——创新大道桥, 对成桥后的斜靠拱桥进行吊杆索力检测; 并建立考虑几何及材料非线性的斜靠式钢箱系杆拱桥有限元模型, 借助索力检测数据分别与设计索力值和模拟值对比分析, 前者评价桥梁吊杆整体张拉控制效果, 后者验证斜靠拱桥模型的可靠性; 进而对该斜靠式系杆拱桥的稳定性进行了研究。结果表明: 实测值与设计值最大误差为3.91%, 该斜靠式拱桥吊杆整体张拉控制效果较好; 实测值与模拟值最大误差为0.63%, 验证了模型的可靠性。其次, 施工全过程拱桥结构的稳定系数满足工程要求; 斜靠钢箱拱对下承式系杆拱桥稳定性提升程度为72%, 斜靠式系杆拱桥的弹性稳定性能高低取决于拱肋面外失稳出现的难易程度, 初始几何缺陷对斜靠式系杆拱桥的稳定承载力影响较大; 斜靠拱和风撑两者协同工作能显著提高结构稳定承载力。最后给出该类系杆拱桥的设计建议, 为同类工程施工和设计提供参考。

关键词: 拱桥; 斜靠拱; 钢箱系杆; 稳定性; 索力检测

中图分类号: U448.22

文献标识码: A

Stability Analysis and Cable Force Detection of Completed Bridge on Slanting Type Tied-arch Bridges with Steel Box Arch Ribs

Ji Jing^{1,2}, Luo Gan^{1*}, Jiang Xinhe³, Wei Chenyang², Yuan Changchun²,
Jiang Liangqin¹, Zhang Zhanbin¹

(1. Heilongjiang Key Lab of Disaster Prevention, Mitigation and Protection Engineering, Northeast Petroleum University, Daqing, Heilongjiang 163318, China; 2. School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150090, China; 3. China Railway Construction Bridge Engineering Bureau Group Fifth Engineering Co., Ltd., Chengdu, Sichuan 610500, China)

Abstract: In order to study the stability analysis on slanting type tied-arch bridges with steel box arch ribs (five arch ribs), relying on the project of diverting the Huaihe River from the Yangtze River, the through slanting type arch bridge-Chuangxin Avenue Bridge, the suspender cable force detection was carried out on the slanting type arch bridge after completed bridge, a finite element model of the tied-arch bridge on slanting type tied-arch bridges with steel box arch ribs considering the geometric and material nonlinearity was established. The former evaluated the overall tensioning control effect of the bridge suspenders and the latter verified the reliability of the tilt over-arch model, then the stability of the tilt-over-arch bridge was studied. The results show that: (1) the maximum error between the measured and designed values is 3.91%, and the overall tensioning control effect of the tilt-over-arch bridge is good. The maximum error between the measured and simulated values is 0.63%, which verifies the reliability of the model; (2) the stability coefficient of the arch bridge structure during the whole construction process meets the engineering requirements, and the slanting type arch bridge with steel box

收稿日期: 2022-10-18

基金项目: 黑龙江省自然科学基金联合引导项目(LH2020E018); 东北石油大学创新引导项目(2020YDL-02)

作者简介: 计静(1975-), 男, 黑龙江五常人, 博士, 教授, 主要从事新型组合结构抗震方面的研究。

* 通讯作者: 罗干(1996-), 男, 山西孝义人, 硕士研究生, 主要研究方向为组合结构拱的稳定性能。

improves the stability by 72%; (3) the elastic stability depends on the difficulty of the out-of-plane instability of arch rib, and the initial geometric defects have a great influence on the stable bearing capacity of the slanting type tied-arch bridge. In addition, the cooperative work of the slanting arch ribs and the wind bracing can significantly improve the stable bearing capacity of the structure; and (4) the design suggestions for this type of tied-arch bridge are given, which can provide a reference for the construction and design of similar projects.

Key words: arch bridge; slanting arch rib; steel box tie rod; stability; cable force detection

随着城市改扩建程度的加深,部分服役桥梁依据发展规划需破旧立新。新建市政桥梁通常既要满足跨度、净高和通航要求,也要务求桥型的新颖和美观。下承式系杆拱桥因其外形优美、桥下净空大以及能克服软弱地基环境等因素而被广泛采纳^[1-3]。1987年,世界上首座斜靠式拱桥——Bac de Roda Bridge 被成功建造^[4],此后市政跨渠桥梁在下承式系杆拱桥基础上引入了斜靠拱。其优势在于通过内倾的边拱增强整体结构抗扭转和侧倾能力,并利用斜拱与立拱形成人行通道和观景平台,满足城市宽幅桥梁的需求^[5]。已建的斜靠式系杆拱桥横向拱肋多为2~4片,横向5片拱肋的下承式斜靠钢箱系杆拱桥传力复杂,且斜靠拱未与整体结构形成空间体系之前存在较大的施工安全隐患,因此该桥型在施工阶段的稳定性需重点关注。

国内一些学者已经对系杆拱桥的稳定性开展了相关研究,刘钊等^[6]基于解析公式推导结合数值仿真验证,得到了系杆拱桥结构参数对其面外稳定承载力的影响;柴生波等^[7]采用 MIDAS/Civil 软件对某系杆拱桥进行了施工阶段稳定性分析,厘清了考虑初始缺陷的几何非线性、材料非线性、风撑、临时风撑、吊杆非保向力和抗风缆索对结构施工阶段稳定的影响。与此同时,随着斜靠式拱桥的发展,部分学者结合工程实例也对其稳定性进行了探索,肖汝诚等^[8]以昆山玉峰大桥为例,提出了无推力斜靠式拱桥体系,使斜靠式拱桥进入国内大众视野;王玉银等^[9]以金山大桥为例,对斜靠式钢管混凝土拱桥的稳定承载力进行了分析,剖析了斜靠拱对钢管混凝土拱稳定性能的影响;刘昌永^[10]基于韩江北桥工程实例,研究了斜靠式钢管混凝土拱桥的稳定性能,揭示了在水平荷载作用下斜靠拱的受力机理,对比分析了斜拱肋和风撑对提高拱肋稳定性的作用。

以上研究主要聚焦于系杆拱桥和斜靠拱桥的稳定性研究,而将斜靠拱与系杆拱桥相结合的斜靠式系杆拱桥工程应用较少,针对其稳定性的研究还不完善,尤其是五片拱肋的斜靠钢箱系杆拱

桥,其桥型较为新颖;其次,拱肋截面为钢箱,相较于钢管混凝土截面更容易发生失稳破坏,同时斜靠拱在施工过程中因其倾斜的线形对桥梁的稳定承载力影响较大;因此开展下承式斜靠钢箱系杆拱桥稳定性研究对于此类桥梁设计施工具有一定的工程应用价值。基于此,本文结合引江济淮工程采用 MIDAS Civil 软件,建立精细化有限元模型(Finite Element Modeling, FEM),通过推导频率法测试吊杆索力理论阐明索力动测仪工作原理,进而借助吊杆索力实测数据验证模型可靠性,评述桥梁吊杆整体张拉控制效果。而后对斜靠式钢箱系杆拱桥进行稳定性分析,讨论斜靠钢箱系杆拱的稳定性能,对比分析斜靠拱和风撑协同工作对拱桥整体稳定性的贡献。

1 频率法测试吊杆索力理论

利用频率法测试索力是测试结构自振频率、分析其自振特性从而求出索力的方法^[11-12]。基于弦振动理论中的一维波动方程,建立吊杆自由振动模型。如图1所示,在张拉力作用下,吊杆的横向位移为 $u(x, t)$ 是随坐标轴 x 和时间 t 连续变化的函数。截取吊杆上一微元 Δx 为隔离体。微元吊杆在运动过程中处于动平衡状态,利用水平力及力矩平衡条件建立平衡方程,推导索力与频率之间的关系。根据吊杆的弯曲理论及 D'Alembert's 原理^[13],得式(1)~(4)。

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = P \quad (1)$$

$$\frac{\partial Q(x + \Delta x, t)}{\partial x} \Delta x = mf_l \Delta x \quad (2)$$

$$\frac{\partial M(x + \Delta x, t)}{\partial x} \Delta x = T(x + \Delta x, t) \frac{\partial u}{\partial x} \Delta x + \quad (3)$$

$$Q(x + \Delta x, t) \Delta x - f_m$$

$$f_l = \ddot{u} = \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}, f_m = \rho I \frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} \Delta x \quad (4)$$

式中: m 表示质量(kg), c 表示阻尼系数($N \cdot s/m$), k 表示刚度(N/m), I 为转动惯量($kg \cdot m^2$)。

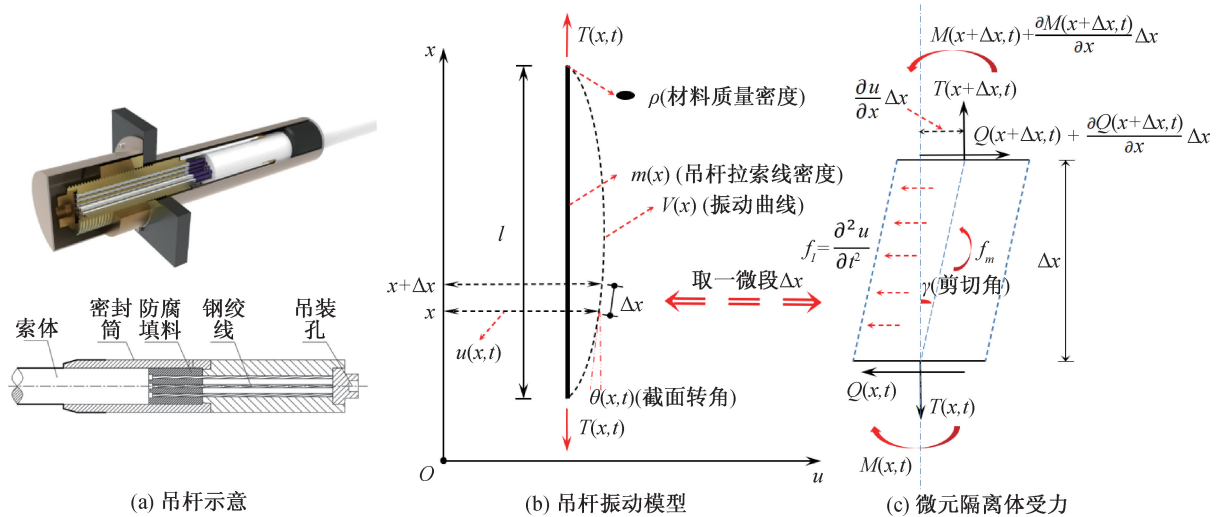


图 1 吊杆振动模型及微元隔离体受力图

Fig. 1 Boom vibration model and force diagram of micro-element isolation body

根据吊杆弯曲理论^[14]以及材料力学中弯矩与曲率关系,得式(5)~(7)。

$$Q(x, t) = S_c AG \gamma = 6(1 + \mu) / (7 + 6\mu) AG \gamma \quad (5)$$

$$\frac{\partial u(x, t)}{\partial x} = \gamma + \theta \quad (6)$$

$$M = -EI \frac{\partial u(x, t)}{\partial x} \quad (7)$$

式中: γ 为剪切角(deg), μ 为泊松比, A 为截面面积(m^2), S_c 为截面有效抗剪系数, G 为剪切模量(Pa), EI 为抗弯刚度($N \cdot m^2$)。

假定位移函数 $u(x, t)$ 为简谐振动,再根据两端铰接边界条件求得通解,最终得到吊杆索力公式,见式(8),第 3、4、5 项分别考虑了转动惯量、剪切变形,及其两者的耦合的影响。

$$T = 4ml^2 \left(\frac{f_n}{n}\right)^2 - \frac{\pi^2 EI}{l^2} n^2 + 4\pi^2 \rho l f_n^2 + \frac{4\pi^2 I m f_n^2}{S_c AG} - \frac{16\pi^2 I l^2 m \rho f_n^4}{S_c AG n^2} \quad (8)$$

在不考虑转动惯量和剪切变形时,张拉力公式见式(9)。式(1)~(9)中变量的物理意义见文献[15-16]。

$$T = 4ml^2 \left(\frac{f_n}{n}\right)^2 - \frac{\pi^2 EI}{l^2} n^2 \quad (9)$$

公式(5)中可得 $f_l = f_n/n$,说明只要通过吊杆索横向加速度平均谱确定某阶频率的阶数,便可计算出吊杆索力。

2 工程背景及有限元模型

2.1 工程概况

引江济淮工程创新大道桥原址老桥为预制空心板桥,跨径布置 3×19 m,桥面全宽 60 m。新建主桥为单跨下承式斜靠钢箱系杆拱桥,跨径 140 m,宽 70 m。拱圈及主纵梁均采用钢箱结构,钢材型号为 Q345qd;主拱采用五片钢箱拱,分别为一片中立拱、两片边立拱、两片斜靠拱;其中斜靠拱向内倾角度为 15° ,拱肋中心跨径为 138 m,立拱立面矢高位 30 m,斜拱斜平面矢高为 31.2 m;加劲肋为板式加劲,尺寸为 $14 \text{ mm} \times 160 \text{ mm}$;五片肋拱轴线均采用二次抛物线,相邻两片拱肋通过 5 道钢箱横向风撑连为一体,风撑的外尺寸均为 $1.24 \text{ m} \times 1.24 \text{ m}$,顶底板及腹板厚度均为 20 mm。纵梁采用刚性与柔性组合系杆,即钢纵梁结构,其作为主受力结构承受拱圈的水平推力,同时,也作为桥面系的加劲梁结构。吊杆及预应力束采用 1860 钢绞线组成的钢束;桥面系采用正交异性钢桥面板,采用沥青混凝土桥面铺装;中跨钢箱梁共分为 13 个梁段,节段标准长度为 12 m;下部结构采用承台+群桩基础;梁段间工地接缝除 U 肋对接为栓接外,其余均为焊接,吊杆与钢梁的锚固结构也为全焊结构。桥梁 3D 模型及结构示意图如图 2 所示。

2.2 有限元模型建立

采用 MIDAS/Civil 有限元软件建立主桥施工阶段的精细化有限元模型。将梁段划分和截面尺寸作为基准,对主梁和拱肋进行单元划分,主梁采

用梁单元,并采用梁格法模拟桥面系受力,共1912个单元;拱肋、风撑同样采用梁单元,共720个单元;吊杆采用桁架单元,共100个单元。钢纵梁、主梁、拱肋及吊杆等构件容重取 76.98 kN/m^3 。钢材本构模型采用标准双折线模型,应变强化刚度为 $E_2 = E/100$,Q345钢材本构模型见文献^[17]。采用两端简支的约束形式,有限元模型如图3所示。

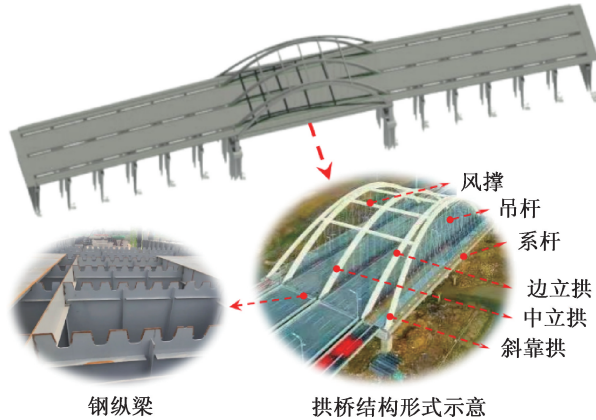


图2 拱桥三维模型及结构示意

Fig. 2 3D model and structure diagram of arch bridge

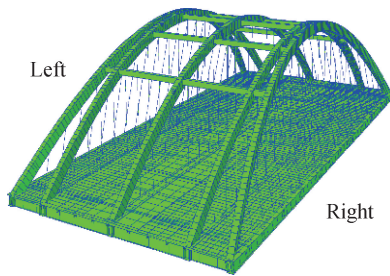


图3 斜靠式钢箱系杆拱桥有限元模型

Fig. 3 Finite element model of the slanting type tied-arch bridges with steel box arch ribs

进行施工阶段的数值分析,须在全桥模型中建立结构组、边界条件和荷载组,然后通过激活和钝化各个施工阶段的结构、边界条件以及荷载,以模拟真实的桥梁施工过程。根据施工方案,分17个施工阶段模拟主桥实际施工,具体施工阶段划分如表1所示。每个吊杆组分为斜靠拱(L&R),边立拱(L&R),以及中立拱(M)。

3 吊杆成桥索力检测及模型验证

3.1 吊杆索力检测

频率法测试吊杆索力是用高灵敏度的传感器采集吊杆索的自振频率,再根据吊杆索的自振频率与索力之间的关系推算吊杆索力。为检测方便,吊杆拉索索力检测采用JMM-268型号索力动测仪。

表1 施工阶段划分

Tab. 1 Division of construction stages

施工阶段	施工内容	持续时间/d
CS 1	架设钢系梁	30
CS 2	拼装桥面系	30
CS 3	搭设拱圈托架	10
CS 4	吊装主拱并同步安装吊杆	30
CS 5	张拉吊杆组 1(D1)	5
CS 6	张拉吊杆组 2(D2)	5
CS 7	张拉吊杆组 3(D3)	5
CS 8	张拉吊杆组 4(D4)	5
CS 9	张拉吊杆组 5(D5)	5
CS 10	张拉吊杆组 6(D6)	5
CS 11	张拉吊杆组 7(D7)	5
CS 12	张拉吊杆组 8(D8)	5
CS 13	张拉吊杆组 9(D9)	5
CS 14	张拉吊杆组 10(D10)	5
CS 15	拆除支架	10
CS 16	张拉柔性系杆	10
CS 17	桥面施工	30

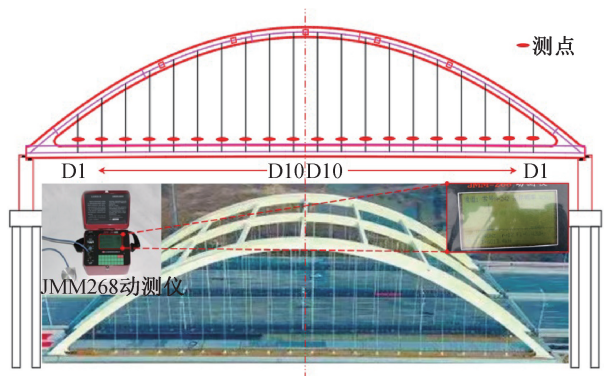


图4 测点位置及索力动测仪

Fig. 4 Measured position of measuring point and cable force dynamic tester

检测人员将索力动测仪的拾振器附着于吊杆下端,测点位置见图4所示,吊杆组编号由支点位置至跨中依次为D1—D10,再通过拾取吊杆的振动信号,然后经过滤波、放大、谱分析,得到吊杆的自振频率,再根据索力与吊杆频率间的固有关系来确定索力,成桥阶段吊杆实测索力值即为动测仪界面显示索力值,将仪表盘上所显示频率根据上述理论公式求得理论索力值,对比发现差异不是很大,平均误差在5%左右,验证了上述公式推导的正确性,但因所测位置均位于吊杆下方,频率所测频率以高阶频率为主,索力识别值偏大,所以仍需进一步修正才能和仪器所测索力吻合。经统计,试验实测索力见表2中N2,因桥跨结构对称,各拱肋只给出1/2立面的吊杆索力值,边立拱和斜

靠拱只给出误差较大的 1 组数据。

依照吊杆的张拉方法,采用正装-倒退优化分析方法,依次得到各施工阶段的吊杆索力,最终求得其有限元模型(FEM)优化索力,见表 2 中 N3。

3.2 索力差异化分析

基于 FEM 优化后得到的吊杆成桥索力 N3,与 N1、N2 进行索力差异化分析,各吊杆成桥索力值见图 5。由此可得上述三者索力值均相差不大,即使出现某几根吊杆与设计值、模拟值有一定差异,误差也均在 5%以内(表 2)。表明了创新大道桥吊杆张拉控制效果较好,同时也验证了有限元模型建立的可靠性。

由图 5 还可推知,斜靠拱倾斜角度为 15°时,该结构形式的同一编号吊杆在中立拱、边立拱及

斜靠拱中索力值占比有所不同,成桥阶段中立拱吊杆索力达到了所在桥梁横截面吊杆索力总和的 46.60%,以此类推,边立拱占比达 35.07%,斜靠拱占比达 18.34%,大致占比约为 8:6:3,与各拱肋张拉的体外预应力钢绞线的数量比例相近,表明其结构形式设计的合理性。

4 施工阶段稳定性分析

4.1 特征值屈曲分析

系杆拱桥在荷载作用下的特征值屈曲分析结果见表 3 和图 6,表 3 中给出前 12 阶稳定安全系数 K 以及屈曲模态。从表 3 可以看出,第 1 阶屈曲模态 $K=15.26>[K]=4^{[18]}$,其稳定性能满足施工及服役要求。前 6 阶的面外失稳屈曲模态振型正

表 2 成桥设计索力、实测索力以及有限元模型优化索力三者对比

Tab. 2 Comparison of design cable force, measured cable force and FEM optimized cable force

吊杆索编号	成桥设计索力 N1/kN	实测索力 N2/kN	FEM 优化索力 N3/kN	N1 与 N2 误差/%	N2 与 N3 误差/%
MD1	1 120	1 120.48	1 118.91	0.04	-0.14
MD2	1 000	999.43	997.19	-0.06	-0.22
MD3	860	866.28	863.44	-0.43	-0.33
MD4	850	851.79	848.43	0.21	-0.40
MD5	860	861.61	857.80	0.19	-0.44
MD6	910	912.06	907.88	0.23	-0.46
MD7	890	891.18	886.69	0.13	-0.50
MD8	880	886.30	881.59	0.72	0.54
MD9	930	929.69	924.82	1.05	0.52
MD10	930	931.45	926.51	0.16	-0.53
BLD1	850	842.81	844.06	-0.85	0.15
BLD2	600	591.67	593.47	-1.39	0.30
BLD3	590	583.28	585.56	-1.14	0.39
BLD4	590	581.39	584.08	-1.46	0.46
BLD5	700	693.87	696.92	-0.88	0.44
BLD6	715	703.16	706.51	-1.66	0.47
BLD7	715	699.07	702.66	-2.23	0.50
BLD8	720	711.91	715.68	-1.12	0.52
BLD9	690	676.73	680.62	-1.92	0.56
BLD10	745	737.27	741.22	-1.04	0.53
XKD1	460	463.42	464.05	0.74	0.14
XKD2	380	385.90	386.80	1.55	0.24
XKD3	320	323.52	324.66	1.10	0.36
XKD4	360	366.34	367.69	1.76	0.38
XKD5	360	365.90	367.44	1.64	0.43
XKD6	350	353.32	355.00	0.95	0.48
XKD7	350	354.34	356.14	1.24	0.51
XKD8	350	355.86	357.75	1.67	0.54
XKD9	310	322.12	324.07	3.91	0.63
XKD10	350	361.01	362.99	3.15	0.57

注:MD 表示中立肋的吊杆拉索,BLD 表示边立肋的吊杆拉索,XKD 表示斜靠肋的吊杆拉索。

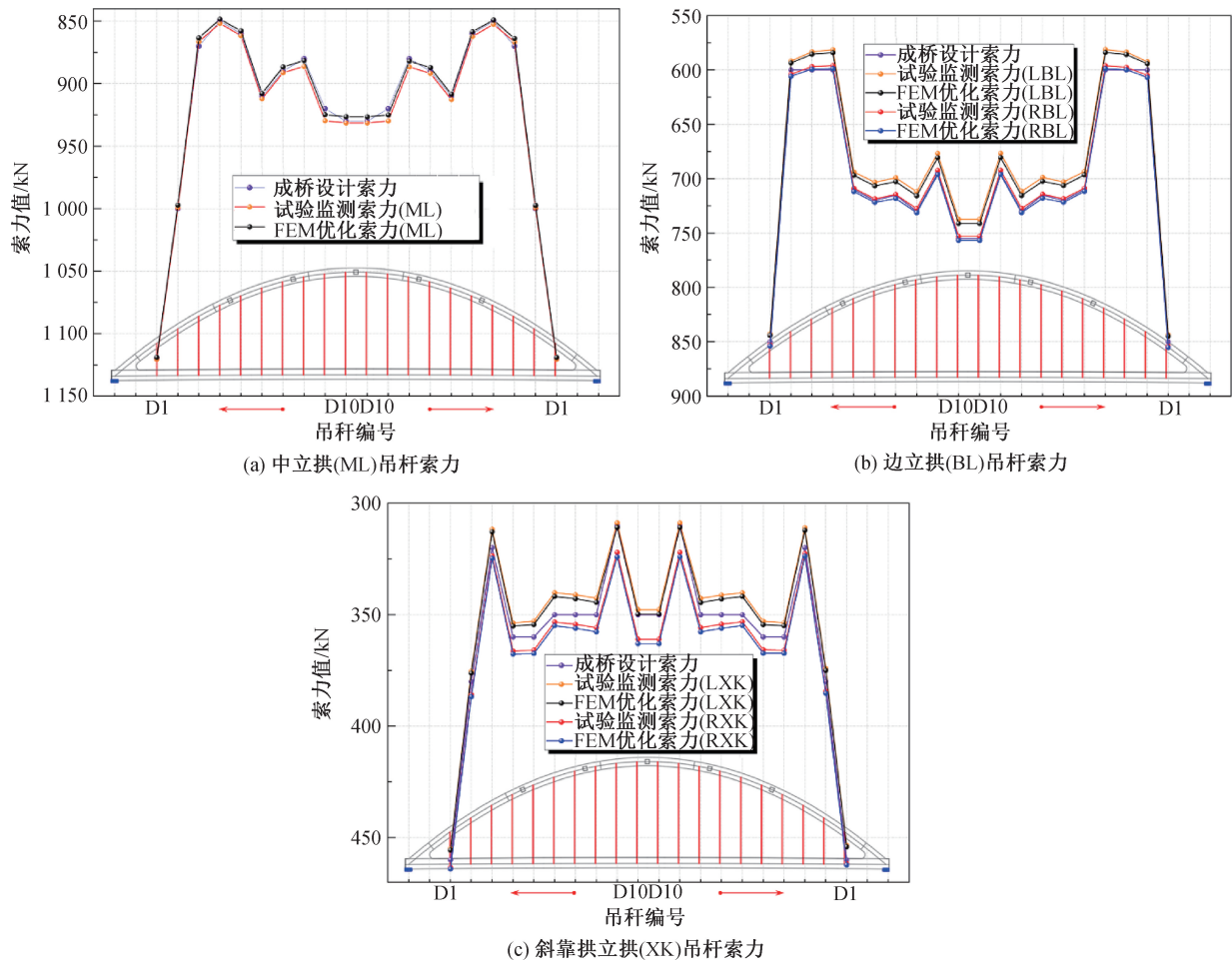


图5 成桥吊杆索力

Fig. 5 The cable force of the suspenders in the bridge completion stage

反对称交替产生,且前9阶模态均未出现面内失稳。第10阶拱肋与桥面系在面内产生同步屈曲,此时五片拱肋面内失稳模态一致,后中立拱跨中位置逐渐向上拱起变形(mode 12),不规则面内屈曲由中立拱率先产生(mode 14),其余拱肋次之(mode 15)。此外,第10阶屈曲系数是第1阶的2.46倍,说明系杆拱桥的桥面系较柔。

4.2 非线性屈曲分析

表4给出了特征值稳定系数、考虑几何非线性稳定系数和考虑几何、材料双重非线性稳定系数,

以及三者之间的相对比值。由表4可知,与特征值稳定系数相比,考虑几何非线性时,稳定系数大幅降低,下降幅值约为41%,在上述基础上引入材料非线性后,稳定系数再次下降,下降幅值约为30%。由此说明,几何非线性对该系杆拱桥稳定的影响大于材料非线性,所以应严格把关拱桥线形控制,提高构件加工精度,降低安装误差。其次,考虑双重非线性的稳定系数 K_3 为4.43,仍然满足工程稳定所要求条件,说明斜靠式系杆拱桥这种结构形式稳定性能较高,可以进一步推广借鉴。

表3 屈曲安全系数及屈曲模态

Tab. 3 Buckling safety factors and buckling modes

阶数	屈曲系数 K	屈曲模态简述	阶数	屈曲系数 K	屈曲模态简述
1	15.26	面外反对称	7	36.75	面外非对称
2	18.54	面外正对称	8	36.91	面外正对称
3	24.95	面外反对称	9	37.38	面外正对称
4	25.79	面外正对称	10	37.50	面内非对称
5	28.71	面外反对称	11	37.95	面外非对称
6	34.24	面外正对称	12	38.43	面内正对称

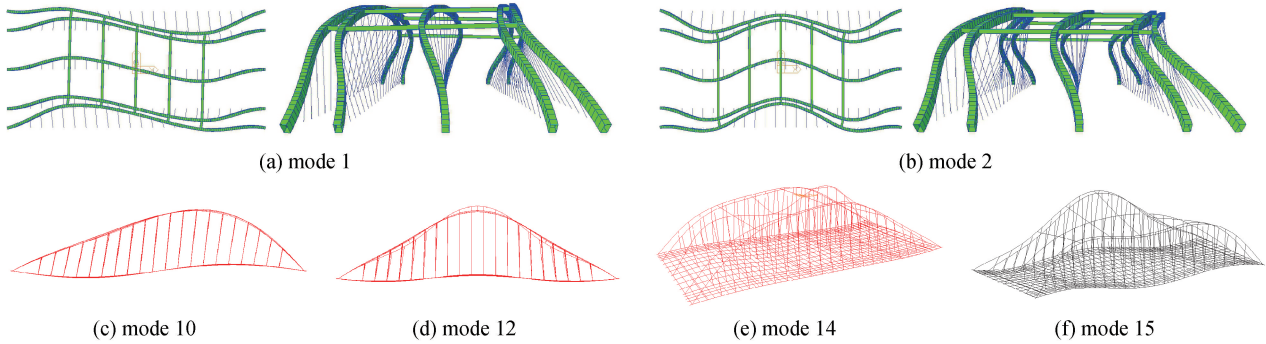


图 6 屈曲模态

Fig. 6 Buckling modes

表 4 稳定系数对比计算结果

Tab. 4 Comparison of calculation results of stability coefficients

特征值稳定系数 K_1	几何非线性稳定系数 K_2	双重非线性稳定系数 K_3	K_2/K_1	K_3/K_1	K_3/K_2
15.26	9.00	4.43	0.59	0.29	0.49

4.3 Civil Designer 整体稳定验算

将施工阶段拱桥的有限元模型导入 MIDAS/Civil Designer 中,对其进行整体稳定验算分析,其计算结果见图 7,其中图 7 (a)中“OK”代表划分的构件单元稳定承载力在包络图内,满足要求,“NG”代表划分的构件单元稳定承载力超出包络图,不满足要求,“NA”代表无需计算。经计算所有构件均显示 OK,表明整体稳定性良好;如图 7 (b),最不利位置发生在中立拱,应力最大为 98.85 MPa < f_d (270 MPa),满足规范^[18]要求。

4.4 考虑斜靠拱和风撑协同工作对稳定承载力的贡献

本文分别计算了不设置斜靠拱有风撑、不设置斜靠拱无风撑、设置斜靠拱有风撑、设置斜靠拱无风撑 4 种情况,通过比较对应的双重非线性稳定系数,分析斜靠拱和一字形风撑对结构稳定承载能力的影响。有限元模型见图 8,不设置斜靠拱的模型去掉下方对应的吊杆,但桥宽不变。通过计算发现,当不设置斜靠拱和风撑时,考虑双重非线

性稳定系数仅为 1.23,不满足设计要求;增加风撑后,其稳定系数提高到 2.58,增加近 1.1 倍,然后增加斜靠拱后,其稳定系数提高到 4.43,再次增加近 0.72 倍,可见斜靠拱和风撑两者协同工作对结构稳定承载力的贡献显著;比较图 8 (a)和(d)模型稳定性系数,可以看出,在无风撑连接各拱肋时,设置斜靠拱对结构稳定承载力的提升不明显。当该结构形式均设有斜靠拱时,一字形风撑对稳定的贡献比重较大,原因为斜靠拱依靠风撑能够形成空间结构整体,更好地受力,一定程度上能有效降低各部件应力、挠度值,所以在设计中能减小拱肋截面面积(用钢量)或增大桥梁跨度,经济效益显著。

5 结论

1) 基于 MIDAS/Civil 软件建立了斜靠式钢箱系杆拱桥精细化有限元模型,与检测索力对比分析后,实测值与设计值最大误差为 3.91%,实测值与模拟值最大误差为 0.63%;说明引江济淮工程

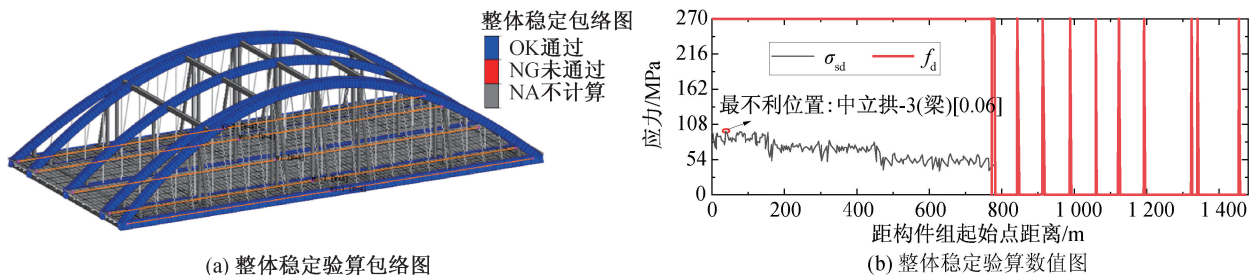


图 7 Civil Designer 稳定验算

Fig. 7 Stability checking in Civil Designer

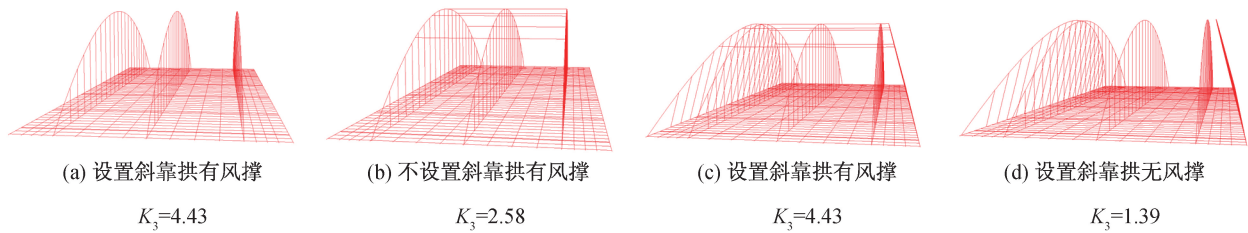


图8 四种有限元分析模型及对应稳定系数

Fig. 8 Four finite element analysis models and corresponding stability coefficients

创新大道桥吊杆整体张拉控制效果较好,并验证了模型的可靠性。此外,当斜靠拱倾斜角度为 15° 时,中立拱、边立拱及斜靠拱的吊杆索力占比约为 $8:6:3$,跟拱肋张拉预应力筋数量比例相近,控制中立拱支点侧吊杆索力是该拱桥吊杆设计的关键环节。

2)通过有限元模型的稳定性分析,可知结构一阶模态屈曲系数为15.26,考虑双重非线性的稳定系数为4.43,均大于[4],表明施工阶段该系杆拱桥的稳定性满足工程要求。前9阶屈曲模态均为拱肋的面外失稳,第10阶才出现箱型拱肋与柔性桥面系的面内同步屈曲,表明拱肋的面外失稳对该桥的稳定承载力起控制作用。

3)基于斜靠式系杆拱桥(5片拱肋)模型,建立不设置斜靠拱和风撑的模型,对比每种模型特征值屈曲、几何非线性及双重非线性三者的稳定系数。分析得出,斜靠钢箱拱对下承式系杆拱桥稳定性提升程度为72%,桥梁施工的线型以及制造安装误差对该桥结构稳定影响较大。斜靠拱和风撑两者协同工作对结构稳定承载力的贡献显著,故在该类型桥梁设计方案比选中,涉及斜靠拱和风撑的设置与否,风撑的优先级应高于斜靠拱。

参考文献:

- [1] 陈宝春,韦建刚,周俊,等.我国钢管混凝土拱桥应用现状与展望[J].土木工程学报,2017,50(6):50-61.
- [2] 刘从新,舒勇,刘燕飞.软土地区斜靠式拱桥设计[J].中外公路,2020,40(6):179-182.
- [3] 刘爱荣,李晶,黄永辉.拱的静动力稳定性研究进展[J].广州大学学报:自然科学版,2016,15(5):1-12.
- [4] 王明明.大跨度中承式钢箱混凝土系杆拱桥受力特性分析与研究[D].成都:西南交通大学,2011.
- [5] 肖汝诚,孙海涛,贾丽君,等.斜靠式拱桥[J].上海公路,2004(4):22-26+5.
- [6] 刘钊,吕志涛.有横撑系杆拱桥的侧向稳定承载力[J].工程力学,2004(3):21-24+54.
- [7] 柴生波,杨清华,王秀兰,等.大跨径中承式钢箱系杆拱桥施工阶段稳定性分析[J].科学技术与工程,2022,22(18):8095-8102.
- [8] 肖汝诚,孙海涛,贾丽君,等.昆山玉峰大桥—首座大跨度无推力斜靠式拱桥的设计研究[J].土木工程学报,2005(1):78-83.
- [9] 王玉银,刘昌永,梁勇,等.斜靠式钢管混凝土拱桥稳定承载力分析及成桥试验[J].建筑结构学报,2015,36(S1):107-113.
- [10] 刘昌永.斜靠式钢管混凝土拱桥静力性能分析[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2007.
- [11] 毛亚娜,刘世忠,叶丹.基于频率法对系杆拱桥吊杆索力测试的分析[J].兰州交通大学学报,2010,29(1):124-128.
- [12] 张戎令,杨子江,朱学辉,等.基于频率计算系杆拱桥吊杆张拉力的实用公式[J].西南交通大学学报,2015,50(5):823-829.
- [13] 刘晶波,杜修力.结构动力学[M].北京:机械工业出版社,2005.
- [14] DYM Clive L, SHAMES Irving H. Solid Mechanics: A Variational Approach [M]. Augmented Edition. New York: Springer-Verlag New York Inc, 2013.
- [15] 代金鹏,王起才,张戎令,等.频率法测试系杆拱桥吊杆索力影响因素研究[J].施工技术,2014,43(17):70-72.
- [16] 张戎令,王起才,马丽娜,等.考虑转动惯量和剪切变形耦合的铰接吊杆索力实用计算公式[J].中国铁道科学,2014,35(5):30-37.
- [17] 高德志,侯晓武,赵继. MIDAS Building 中的动力弹塑性分析功能[J].建筑结构,2012,42(S2):217-220.
- [18] JTG D64—2015,公路钢结构桥梁设计规范[S].

(责任编辑 王利君)