

# 下承式钢筋混凝土拱桥温度作用下屈曲稳定性分析

肖位林

(贵州黔程弘景工程咨询有限责任公司, 贵州 贵阳 550000)

**摘要:** 下承式钢筋混凝土拱桥拱肋因材料受日照温差影响较大易产生温度应力和变形, 对全桥屈曲性能产生影响。为探究下承式钢筋混凝土拱桥在温度作用下的屈曲稳定性, 文中建立 ANSYS 有限元模型, 对太阳辐射作用产生的非线性温度场、均匀温度作用、构件间温差作用和无温度作用下拱桥屈曲性能进行对比分析。结果表明, 全桥整体升温对下承式钢筋混凝土拱桥屈曲稳定性的影响最大, 主梁的温度变化次之, 主拱圈温度变化的影响最小, 影响量分别为 57.0%、30.3%、0.5%; 主拱圈单侧升温对屈曲稳定性的影响比双侧升温的影响大, 主拱圈非均匀温度场比主拱圈均匀温度场更容易降低下承式钢筋混凝土的屈曲稳定性。

**关键词:** 桥梁; 下承式钢筋混凝土拱桥; 屈曲稳定性; 非均匀温度场

中图分类号: U441

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2023)05-0115-05

下承式钢筋混凝土拱桥的拱脚通常直接锚固在基础上, 主梁与拱脚相连。温差、太阳辐射等环境温度的改变会使拱圈、主梁等结构产生温度应力和变形, 并且可能由于太阳辐射位置不同、遮挡位置不同造成各构件间产生温差和不均匀温度场。这种温度应力分布形式会对下承式钢筋混凝土拱桥结构性能产生影响, 且不同类型温度作用会产生不同程度的影响。目前, 针对不同温度作用对不同结构强度和稳定性的影响进行了大量研究。马越等采用 5 种壳体屈曲方法分析了不同温度作用对大直径钢管仓屈曲稳定性的影响<sup>[1]</sup>; 刘定坤等通过三维有限元模型研究不同温度荷载作用下大跨下承式钢箱系杆拱桥的跨中挠度和纵向变形, 分析了不同温度荷载作用对其变形的影响<sup>[2]</sup>; 周大为基于大跨度钢管混凝土拱桥温度场监测数据, 分析了不同温度作用对其强度的影响, 并进行了参数敏感性分析<sup>[3]</sup>; 廖辉等基于现场实测温度及变形数据, 通过建立大跨径四肢桁架钢管拱桥有限元模型, 分析了日照温度场对其拱肋强度的影响<sup>[4]</sup>; 于孟生等以平南三桥为工程背景, 基于拱肋现场实测温度场数据, 分析了最不利温差对拱桥受力行为的影响<sup>[5]</sup>; 陈冠桦等建立大跨斜拉钢管混凝土拱桥 ANSYS 空间有限元模型计算其屈曲稳定性, 分析了各构件对系杆拱稳定性的贡献量<sup>[6]</sup>; 林煌等建立 MIDAS/Civil 有限元模型, 分析了上承式拱桥拱肋不同宽跨比对其屈曲稳定性的影响及失稳模态特征<sup>[7]</sup>; 龚良勇建立大跨径箱板拱桥

ANSYS 三维有限元模型, 分析了横向缆风索对单肋拱箱合龙稳定性的影响<sup>[8]</sup>; 张志程等建立异性截面钢拱桥有限元模型, 分析了混合有限元和梁单元两种模型的整体和局部稳定性<sup>[9]</sup>; 杨林恺等以桁式组合拱桥为工程背景, 通过建立有限元模型, 研究了主拱圈在拆除过程中的稳定性及考虑初始缺陷的非线性稳定性<sup>[10]</sup>。现有研究大多未考虑不同温度荷载作用对拱桥屈曲稳定性的影响, 虽然有些学者考虑了不同温度作用对屈曲性能的影响, 但仅针对壳体结构, 并未分析拱桥的屈曲稳定性。本文以下承式钢筋混凝土拱桥为工程背景, 将太阳辐射、季节性温差及构件间温差所产生的温度效应与拱桥自身质量和活载进行组合, 建立 ANSYS 三维有限元模型, 分析不同工况对其屈曲稳定性及拱圈应力的影响。

## 1 建立结构有限元模型

### 1.1 工程概况

某下承式钢筋混凝土拱桥的拱轴线为圆弧线, 跨径为 78 m, 矢高为 17.1 m。主拱圈为矩形截面, 采用 C50 混凝土, 混凝土弹性模量为 34 500 MPa, 密度为 2 500 kg/m<sup>3</sup>。主梁材料为 C50 混凝土, 混凝土线膨胀系数为  $1.0 \times 10^{-5}$ 。吊杆为圆形截面, 直径为 10 cm, 采用高强度平行钢丝, 钢丝弹性模量为  $2.06 \times 10^5$  MPa, 密度为 7 850 kg/m<sup>3</sup>, 线膨胀系数为  $1.2 \times 10^{-5}$ 。主拱圈锚固在主梁上。桥型布置见图 1, 主梁构造见图 2、图 3。

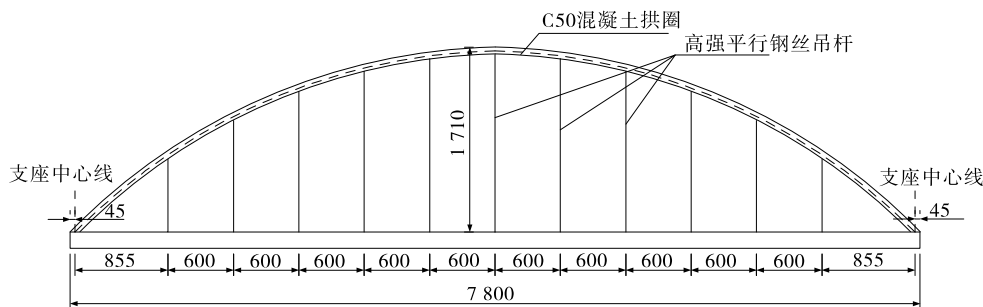


图 1 桥型立面示意图(单位:cm)

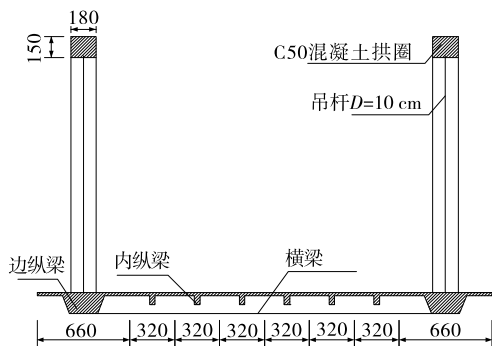


图 2 主梁标准横截面(单位:cm)

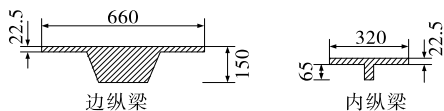


图 3 主梁细部构造(单位:cm)

1.2 数值模型

采用 ANSYS 建立该桥三维有限元模型,主拱圈与主梁采用 Beam 188 梁单元模拟,吊杆采用 Link 8 杆单元模拟。纵梁包括边纵梁和内纵梁 2 个截面,横梁分为两侧端横梁及内横梁 3 个截面,为保证主梁顶面齐平,纵梁及横梁截面的参考点均设置在顶面。由于纵横梁模型与桥面板部分面积重合,为避免重复计算,横梁密度采用扣除重复面积计算所得等效密度。边界条件为主拱圈与主梁、吊杆与主拱圈采用共节点刚接,支座中心位置处主梁约束所有平动自由度。恒载为拱桥自身质量,活载包括人群荷载和汽车荷载。

满布人群荷载,即在所有纵梁上施加梁单元荷载,荷载大小为 3 kN/m<sup>2</sup>。汽车荷载为 6 条车道,纵向折减系数按 JTG D60—2015《公路桥涵设计通用规范》<sup>[1]</sup>取为 0.55,汽车荷载集中力(360 kN)布置在跨中,车道宽度为 3.75 m,考虑偏载情况施加在最近的纵梁上。有限元模型见图 4。

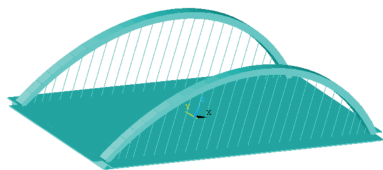


图 4 下承式钢筋混凝土拱桥三有限元模型

1.3 温度荷载

在运营阶段,下承式钢筋混凝土拱桥不仅受季节性温差作用,还受日照温差作用,且由于拱桥各构件受太阳辐射的位置不同,还会产生构件间温差<sup>[12]</sup>。为探究不同温度作用对下承式混凝土拱桥屈曲稳定性的影响,假定该桥的设计成桥温度为 15 ℃。参考文献[2]取表 1 所示温度作用。其中:整体温度变化相当于全桥升温或降温 20 ℃;主拱圈顺桥向温度变化表示太阳辐射作用下主拱圈沿顺桥向的温度不同,取拱顶升温 20 ℃~拱脚降温 10 ℃;主梁—主拱圈温差表示主梁和吊杆的温度不变,主拱圈的温度变化 10 ℃;吊杆—主梁温差表示主梁和主拱圈的温度不变,吊杆的温度变化 10 ℃;主拱圈—吊杆温差表示吊杆和主梁的温度不变,主拱圈的温度变化 10 ℃。

表 1 下承式混凝土拱桥的温度作用

温度作用	温度/℃
整体温度变化	±20
主拱圈顺桥向温度变化	10~20
主梁—主拱圈温差	10
主拱圈—主拱圈温差	10
吊杆—主梁温差	10
主拱圈—吊杆温差	10

对最不利荷载工况与不同温度荷载作用下下承式钢筋混凝土拱桥的屈曲稳定性进行对比分析,荷载工况见表 2。

表 2 荷载工况

工况编号	工况组合	工况编号	工况组合
工况 1	自身质量+人群荷载+汽车荷载	工况 5	自身质量+人群荷载+汽车荷载+单侧主拱圈升温 10 ℃
工况 2	自身质量+人群荷载+汽车荷载+整体升温 20 ℃	工况 6	自身质量+人群荷载+汽车荷载+主梁升温 10 ℃
工况 3	自身质量+人群荷载+汽车荷载+整体降温 20 ℃	工况 7	自身质量+人群荷载+汽车荷载+吊杆升温 10 ℃
工况 4	自身质量+人群荷载+汽车荷载+主拱圈顺桥向按 10~20 ℃变化	工况 8	自身质量+人群荷载+汽车荷载+主拱圈升温 10 ℃

2 拱圈应力及挠度分析

恒载、活载和不同温度荷载耦合作用下该桥温

度场分布见图 5,拱圈应力及跨中挠度见图 6、表 3。  
由图 6 和表 3 可知:1) 全桥整体升温对该桥拱圈应力和跨中挠度的影响最大,导致拱桥的强度降

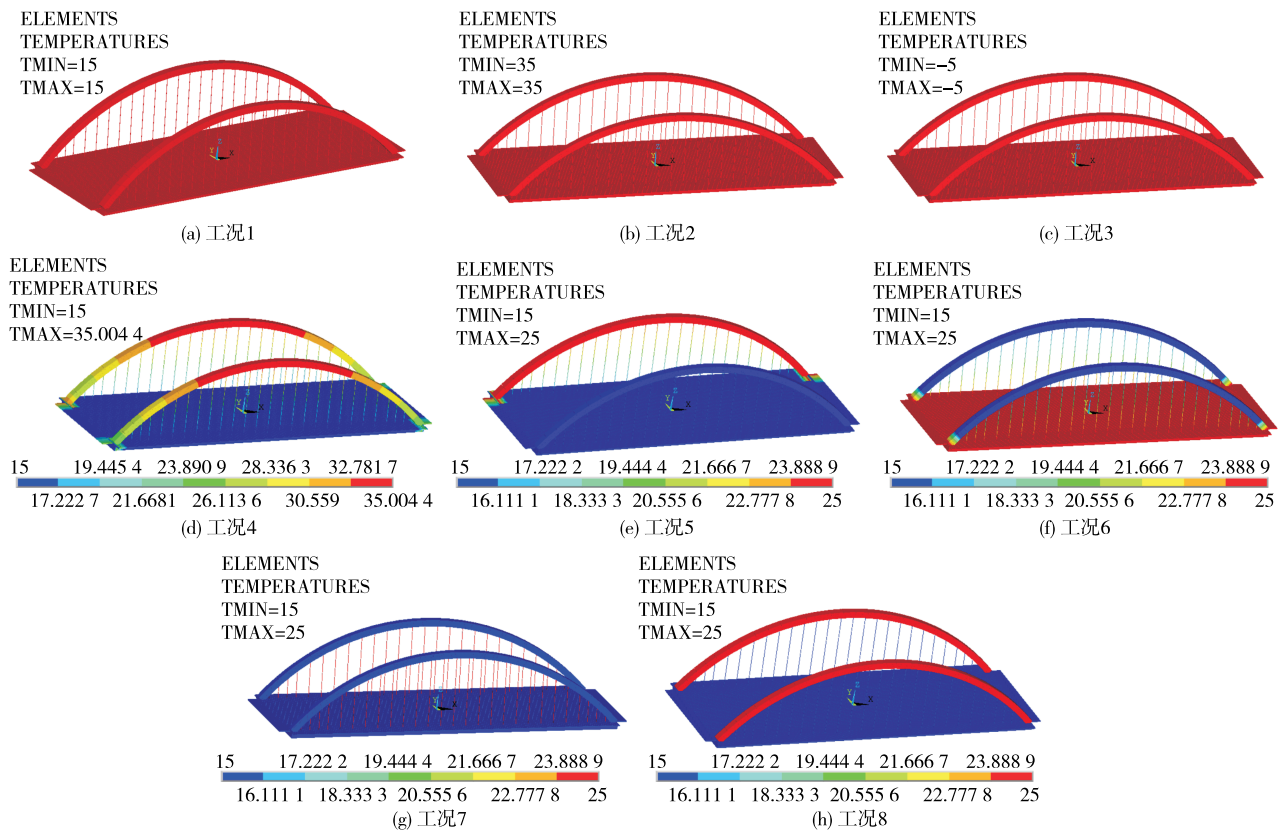


图 5 各工况下下承式钢筋混凝土拱桥的温度场分布(单位:℃)

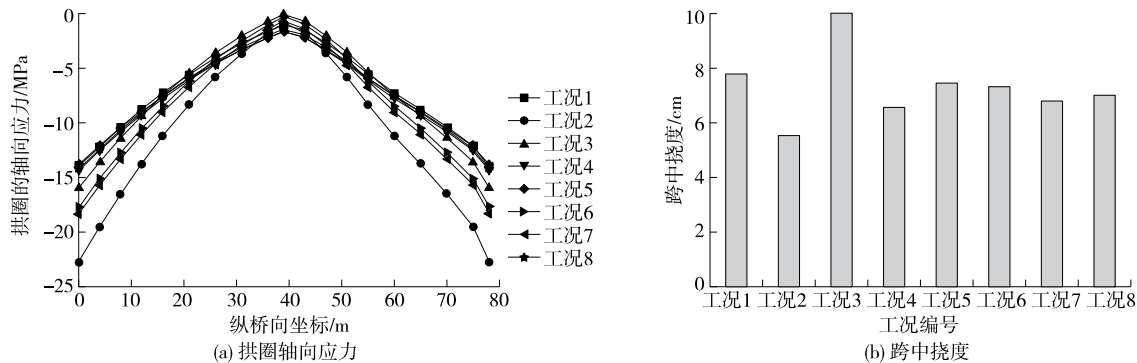


图 6 各工况下下承式钢筋混凝土拱桥的拱圈应力及跨中挠度

表3 各工况下下承式钢筋混凝土拱桥的拱脚应力、跨中挠度及影响量

工况编号	拱脚应力/ MPa	跨中挠度/ cm	拱脚应力 影响量/%	跨中挠度 影响量/%
工况1	-13.41	7.84	—	—
工况2	-22.65	5.53	68.9	-29.5
工况3	-16.43	10.04	22.5	28.1
工况4	-17.74	6.74	32.3	-14.0
工况5	-13.32	7.53	-0.7	-4.0
工况6	-18.62	7.44	38.9	-5.1
工况7	-17.61	6.98	31.3	-11.0
工况8	-13.48	6.82	0.5	-13.0

注:拱脚应力影响量=(恒活载和不同温度荷载耦合作用(工况2~8)下拱脚应力-恒活载作用(工况1)下拱脚应力)/工况1下拱脚应力 $\times 100$ ;跨中挠度影响量=(工况2~8下跨中挠度-工况1下跨中挠度)/工况1下跨中挠度 $\times 100$ 。

低,主要是因为全桥整桥升温,拱圈升高,拱轴线拉长,导致主梁上挠,拱圈的轴向压应力增加;全桥整体降温会降低拱圈应力,增加跨中挠度,从而影响拱桥的刚度,产生原因与整体升温相反。2)拱圈不均

匀升温对拱圈应力及跨中挠度的影响较大,这是因为拱顶温度较高,拱脚温度较低,拱圈升高,拉升拱轴线,主梁上挠;拱圈单侧升温 and 双侧升温对拱圈应力和跨中挠度的影响较小,这是由于拱脚的移动被约束,拱圈升高的位移较小;吊杆及主梁升温对拱圈应力的影响较明显,拱圈升温对其自身应力几乎没有影响。

### 3 结构屈曲稳定性分析

采用 ANSYS 有限元模型计算各工况下该桥的屈曲稳定系数及一阶屈曲模态,工况1~8作用下一阶稳定系数分别为 14.088、6.051、11.703、13.993、13.998、9.819、12.349、14.024,模态特征均表现为拱圈同向一阶屈曲。不同工况下该桥一阶特征值屈曲模态见图7,屈曲稳定系数见表4。

从图7可以看出:主梁或吊杆升温与恒载、活载共同作用下,一阶屈曲模态变形沿横桥中心线对称,主拱圈和主梁均沿竖向发生屈曲变形,其中吊杆与主梁升温,主拱圈和主梁竖向屈曲变形的方向相反;主拱圈单侧升温 and 顺桥向不均匀升温时,一阶屈曲模态均为主拱圈和吊杆朝面外发生变形,主梁没有发生屈曲变形。

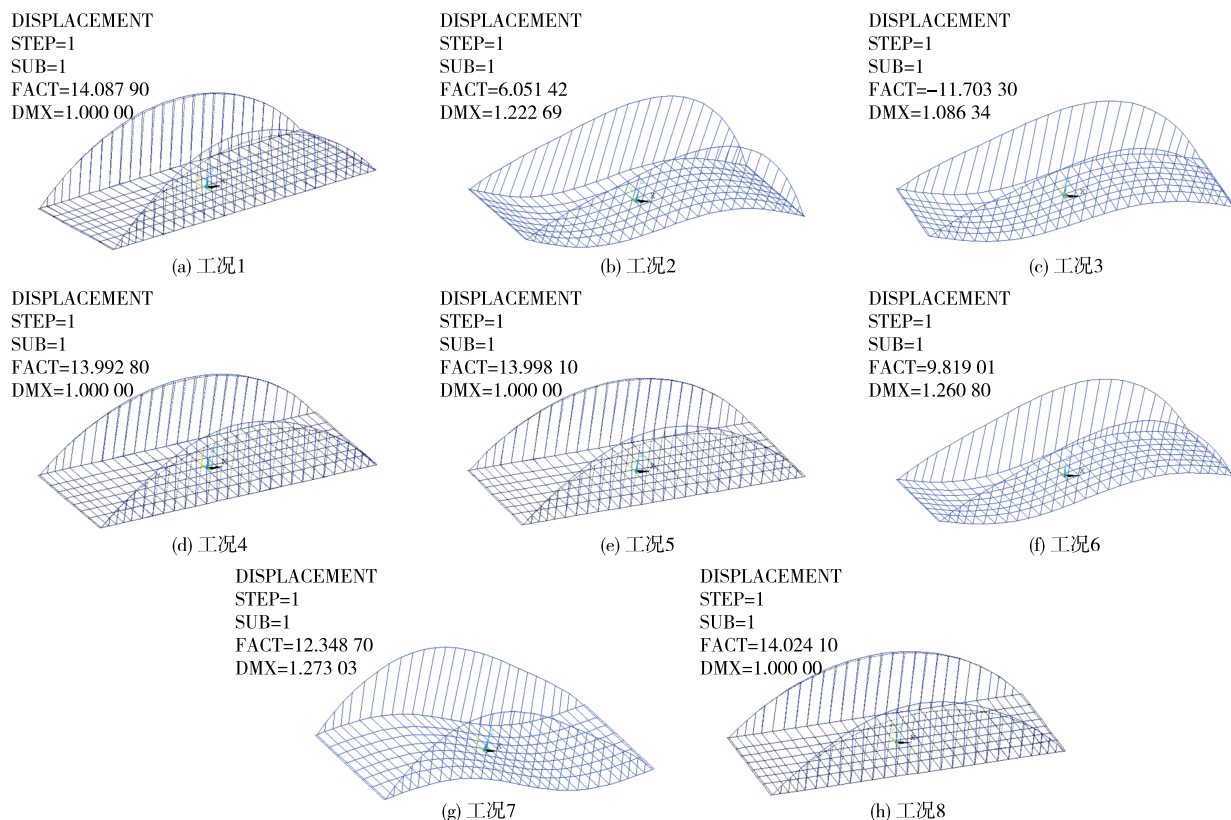


图7 各工况下下承式钢筋混凝土拱桥拱圈同向一阶失稳模态



表 4 各工况下下承式钢筋混凝土拱桥的屈曲稳定系数

工况 编号	各阶屈曲稳定系数				
	一阶	二阶	三阶	四阶	五阶
工况 1	14.088	14.491	16.184	16.687	22.429
工况 2	6.051	11.734	12.778	12.847	13.113
工况 3	11.703	15.669	16.165	17.898	18.516
工况 4	13.993	14.386	16.081	16.572	20.366
工况 5	13.998	14.519	16.089	16.726	21.593
工况 6	9.819	13.448	13.816	15.475	15.932
工况 7	12.349	13.520	13.892	15.556	16.019
工况 8	14.024	14.423	16.115	16.614	21.011

由表 4 可知:1) 该桥屈曲稳定性对温度的敏感性较高,这是因为太阳辐射或季节性温差引起的温度作用影响拱桥的应力和变形进而影响屈曲稳定系数。设计时应考虑温度变化对下承式钢筋混凝土拱桥屈曲稳定性的影响。2) 整体升温对该桥屈曲稳定性的影响最大,影响量为 57.0%,整体降温的影响比整体升温的影响小;主梁升温次之,影响量为 30.3%;吊杆的影响量为 12.3%;主拱圈温度变化的影响最小,为 0.5%。主拱圈沿顺桥向不均匀升温比均匀升温更影响桥梁的屈曲稳定性。主拱圈单侧升温对屈曲稳定性的影响比双侧升温的影响大。

4 结论

(1) 下承式钢筋混凝土拱桥的屈曲稳定性对温度的敏感性较高,太阳辐射或季节性温差引起的温度作用影响拱桥的应力和变形进而影响屈曲稳定系数。设计中应考虑温度变化对下承式钢筋混凝土拱桥屈曲稳定性的影响。

(2) 全桥整体升温对下承式钢筋混凝土拱桥拱圈应力和跨中挠度的影响最大,导致桥梁强度降低;整体降温会降低拱圈应力,增加跨中挠度,从而影响下承式钢筋混凝土拱桥的刚度;拱圈不均匀升温对拱圈应力及跨中挠度的影响较大,拱圈单侧升温 and 双侧升温对拱圈应力和跨中挠度的影响较小;吊杆及主梁升温对拱圈应力的影响较明显,拱圈升温对

其自身应力几乎没有影响。

(3) 全桥整体升温对下承式钢筋混凝土拱桥屈曲稳定性的影响最大,影响量为 50.7%;主梁温度变化次之,影响量为 30.3%;主拱圈的影响最小,影响量为 0.5%。主拱圈单侧升温对下承式钢筋混凝土拱桥屈曲稳定性的影响比双侧升温的影响大,主拱圈非均匀温度场比主拱圈均匀温度场更易降低下承式钢筋混凝土拱桥的屈曲稳定性。

参考文献:

[1] 马越,杨红霞,李盛斌,等.温度作用下大直径钢筒仓热力耦合屈曲分析[J].建筑钢结构进展,2021,23(5):37—44.

[2] 刘定坤,周广东,郑秋怡,等.大跨下承式钢箱系杆拱桥温度变形规律研究[J].河南科学,2021,39(4):604—612.

[3] 周大为.大跨度钢管混凝土拱桥温度场及温度效应研究[D].南宁:广西大学,2021.

[4] 廖辉,王华,郝天之.光照作用下的钢管拱肋变形研究[J].西部交通科技,2021(4):124—127.

[5] 于孟生,邓年春,王龙林,等.特大拱桥钢管混凝土拱肋日照温度效应研究[J].公路工程,2021,46(3):99—104.

[6] 陈冠桦,甄喻惠,贾宏宇,等.大跨度斜拉钢管混凝土拱桥屈曲分析[J].河南大学学报(自然科学版),2010,40(5):537—541.

[7] 林煌,邓通发,廖睿,等.拱肋的不同宽跨比对拱桥屈曲分析的影响[J].科技通报,2016,32(12):205—208.

[8] 龚良勇.大跨径箱板拱桥单肋拱箱合龙稳定性研究[D].重庆:重庆交通大学,2019.

[9] 张志程,徐韬,王家豪.异性截面钢拱桥整体一局部稳定性研究[J].湖南交通科技,2021,47(3):129—131.

[10] 杨林恺,周聪.桁式组合拱桥拆桥过程稳定性分析[J].湖南交通科技,2020,46(4):76—78+103.

[11] 中交公路规划设计院有限公司.公路桥涵设计通用规范:JTGD60—2015[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2015.

[12] 闻超,田仲初,朱清华.大跨度悬臂浇筑 RC 拱桥结构参数敏感性分析[J].公路与汽运,2021(4):126—129+134.