

基于 ANSYS 的某在役悬索桥砼主塔结构性能分析

朱德权¹, 罗向荣², 左传艺³

(1.长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410114; 2.中国恩菲工程技术有限公司, 北京 100038;

3.贵州省交通规划勘察设计研究院股份有限公司, 贵州 贵阳 550001)

摘要: 采用 MIDAS/Civil 建立悬索桥运营期空间分析模型, 通过分析确定该桥塔顶荷载与位移; 利用 ANSYS 建立该桥砼索塔实体有限元模型, 对索塔进行恒载、活载及温度工况下应力验算, 通过索塔应力路径和主应力分析, 确定索塔各荷载工况下结构性能和出现裂缝的原因。结果表明, 在相同温差条件下, 沿塔高方向, 索塔侧面下部(下横梁附近)的第一主应力略高于上部第一主应力, 即同一工况下索塔侧面下部产生裂缝的概率及裂缝大小高于上部; 内外温差对结构影响很大, 特别是温度内高外低时会在结构外表面产生较大拉应力。

关键词: 桥梁; 悬索桥; 砼索塔; 结构性能

中图分类号: U443.38

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2021)02-0112-07

桥梁在运营期承受大量荷载, 其中恒载和活载属于直接荷载, 砼收缩徐变、温度效应属于非直接荷载。对于桥梁砼构件, 温度效应导致的裂缝是其主要病害之一, 大部分砼桥梁裂缝的出现与温度效应有关。因此, 对于该类病害的分析, 除进行恒载、活载作用下结构分析外, 还需进行温度效应分析。

悬索桥是桥梁结构体系中跨越能力最大的桥型, 其主要受力构件是主缆与吊杆组成的缆索系统、加劲梁及桥塔和锚碇结构, 其中主塔主要由钢材或砼建成。运营期桥塔砼出现裂缝是悬索桥的主要病害之一。某在役悬索桥于 1997 年建成通车, 砼桥塔已出现竖向裂缝, 为给桥梁加固提供依据, 对桥塔单独进行建模分析, 分析主塔在恒载、活载及温度作用下的结构性能。

1 工程背景

该桥为主跨 450 m 双塔单跨两铰悬索桥, 主缆跨度组合为 164.5 m + 450.0 m + 130.0 m, 矢跨比为 1/11。水平面内在横向由跨中以曲线向外伸展, 形成外张式, 外张矢度为 $3.25/450 = 1/138.5$, 外张角为 $4^{\circ}9'37''$ 。加劲梁采用平弦三角形钢桁架, 桁高和节间长度均为 3.0 m, 高跨比为 1/150, 主桁中心距 14.0 m, 宽跨比为 1/32.14。桁架杆件采用焊接 H 形截面, 宽 360 mm, 板厚 12~16 mm。横梁位于吊杆处, 按 6 m 间距设置, 采用构造为型钢组成的三角形桁架, 桥面板采用预制砼板加现浇纤维砼。主桥大缆由 61 股 $91\phi 5.2$ 高强镀锌钢丝束采用 PPWS

法形成, 外径 43.8 cm。吊杆为 $\phi 120$ 成品扭绞型拉索。南北索塔都采用钢筋砼 H 形塔, 塔柱壁厚为 60~100 cm, 北、南岸塔高分别为 98.0 和 83.0 m, 塔柱中心距 20.5 m。

2 计算模型与荷载工况

2.1 索塔分析计算参数

2.1.1 荷载

荷载如下: 1) 恒载。为全桥自重及二期恒载作用下塔顶荷载。2) 活载。为在汽车-20 级、挂-100 作用下塔顶荷载。3) 砼收缩徐变。考虑结构砼收缩徐变对索塔的附加内力。4) 温差 I。索塔温度外高内低, 温差 $+10^{\circ}\text{C}$ 。5) 温差 II。索塔温度内高外低, 温差 -10°C 。

2.1.2 材料

桥塔砼材料参数见表 1。

表 1 桥塔砼材料参数

材料参数	参数值
热传导系数/ $[\text{W} \cdot (\text{m} \cdot ^{\circ}\text{C})^{-1}]$	2.71
密度/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	2 550
弹性模量/Pa	3.00×10^{10}
泊松比	0.2
热膨胀系数/ $^{\circ}\text{C}^{-1}$	1.00×10^{-5}

2.2 荷载工况

桥梁运营期除恒载、活载外, 温度效应也是影响桥梁受力的重要因素。鉴于该桥索塔的实际病害为运营期裂缝, 假设 2 种温差条件(温差 I、II)对结构

进行分析。为正确模拟索塔真实的受力状态,将全桥结构的恒载、活载及砣收缩徐变对索塔产生的效应以荷载的形式加载在索塔上。分3种工况进行分析,工况1为恒载+活载+砣收缩徐变,工况2为工况1+温差I,工况3为工况1+温差II。

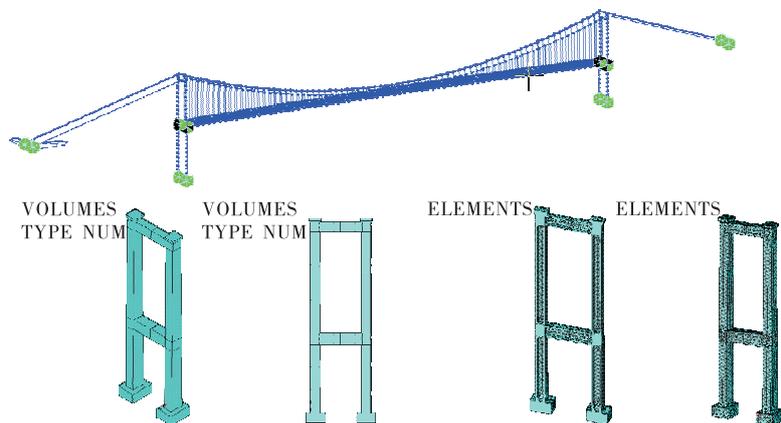


图1 有限元模型

主梁由北岸桥塔伸缩缝起至南岸桥塔伸缩缝止为桁架结构。主梁桁架杆件采用梁单元模拟,因其节点联结有足够刚度,主桁梁节点均为固接,没有引入任何铰接。桥塔由基础底面起,包括塔柱和横梁。主缆为北岸桥塔理论散索点至南岸桥塔理论散索点。吊索由主梁至主缆。

对于桥塔砣结构的局部分析,采用 ANSYS 建立索塔实体模型,分成热分析和结构分析依次计算。桥塔实体模型的建立:先采用 Solid87 单元建立索塔温度场模型,定义砣材料的特性值和边界条件得到热分析模型,通过分析把温差荷载转化成结构温度场;再把 Solid87 单元转化成 Solid92 结构单元,建立桥塔结构分析实体模型,施加由 MIDAS/Civil 整体分析得到的塔顶恒载、活载作用结果,并导入 ANSYS 热分析得到的结果,通过对该模型的分析运算,得到各荷载工况下索塔应力分布。

3 计算结果与分析

3.1 整体受力分析

该文重点分析桥塔的结构性能,故不列出主缆和主梁的分析结果,只给出主塔在恒载、活载组合及最不利荷载组合作用下的受力结果:1) 恒载和活载组合下,北岸塔顶最大内力为 93.5 MN,南岸塔顶最大内力为 100.8 MN。极限状态最不利荷载组合下,北岸塔顶最大内力为 113.7 MN,南岸塔顶最大内力为 125.4 MN。2) 恒载和活载组合下,北岸塔顶最

2.3 有限元模型

MIDAS/Civil 整体分析模型采用每一节点 6 个自由度的杆系单元,主缆及吊索采用缆索单元,只有轴向自由度,再配以几何非线性(见图 1)。由于边跨引桥独立于大桥,无需模拟。

大位移为 0.54 m,南岸塔顶最大位移为 0.45 m。极限状态最不利荷载组合下,北岸塔顶最大位移为 0.69 m,南岸塔顶最大位移为 0.58 m。

由于塔柱为偏心受压构件,通过塔顶内力和位移可看出,南侧塔柱受力更为不利。

3.2 索塔局部分析

该桥南北索塔受力状况大同小异,选择所受恒载和活载较大、受力更为不利的南索塔进行分析。为便于观察索塔表面应力结果,在索塔塔柱侧面(近横梁侧)中心设置从底至顶的应力结果观察路径 A,在索塔侧面(背横梁侧)中心设置从底至顶的应力结果观察路径 C,在索塔顺桥向一侧塔柱正面中心设置从底至顶的应力结果观察路径 B,在索塔顺桥向一侧塔柱背面中心设置从底至顶的应力结果观察路径 D(见图 2)。压应力为负,拉应力为正。

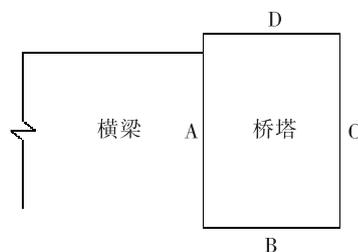


图2 索塔应力观察路径示意图

3.2.1 工况 1 作用结果

图 3、图 4 为工况 1 作用下索塔第一、第三主应力云图。由图 3、图 4 可知:在恒载、活载及砣收缩

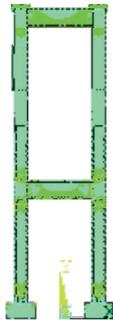
徐变效应作用下,索塔侧面的第一主应力较大,最大达 0.9 MPa;索塔正面及背面的第一主应力较小,远

小于使砼开裂的应力。

根据应力计算结果绘制桥塔结构应力路径图

NODAL SOLUTION

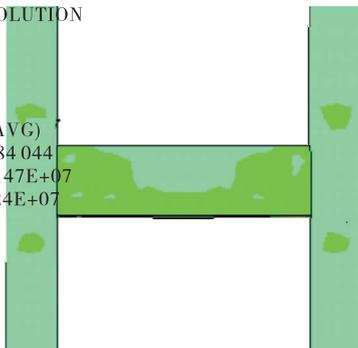
STEP=1
SUB=1
TIME=1
S1 (AVG)
DMX=0.084 044
SMN=-0.147E+07
SMX=0.224E+07



-0.147E+07 -646 602 179 270 0.101E+07 0.183E+07
-0.106E+07 -233 666 592 205 0.142E+07 0.224E+07

NODAL SOLUTION

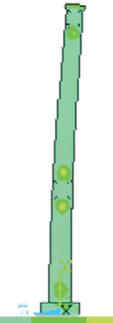
STEP=1
SUB=1
TIME=1
S1 (AVG)
DMX=0.084 044
SMN=-0.147E+07
SMX=0.224E+07



-0.147E+07 -646 602 179 270 0.101E+07 0.183E+07
-0.106E+07 -233 666 592 205 0.142E+07 0.224E+07

NODAL SOLUTION

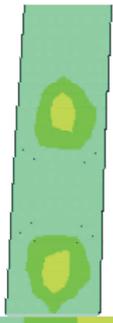
STEP=1
SUB=1
TIME=1
S1 (AVG)
DMX=0.084 044
SMN=-0.147E+07
SMX=0.224E+07



-0.147E+07 -646 602 179 270 0.101E+07 0.183E+07
-0.106E+07 -233 666 592 205 0.142E+07 0.224E+07

NODAL SOLUTION

STEP=1
SUB=1
TIME=1
S1 (AVG)
DMX=0.084 044
SMN=-0.147E+07
SMX=0.224E+07

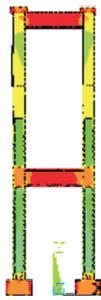


-0.147E+07 -646 602 179 270 0.101E+07 0.183E+07
-0.106E+07 -233 666 592 205 0.142E+07 0.224E+07

图3 工况1作用下索塔第一主应力云图(单位:Pa)

NODAL SOLUTION

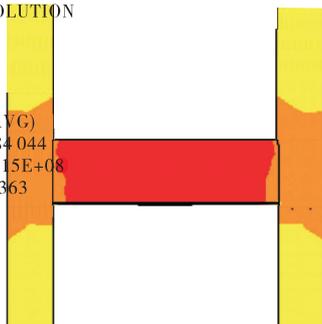
STEP=1
SUB=1
TIME=1
S3 (AVG)
DMX=0.084 044
SMN=-0.115E+08
SMX=709 363



-0.115E+08 -0.881E+07 -0.609E+07 -0.337E+07 -650 366
-0.102E+08 -0.745E+07 -0.473E+07 -0.201E+07 709 363

NODAL SOLUTION

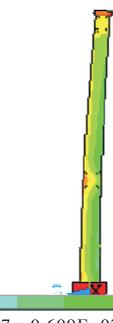
STEP=1
SUB=1
TIME=1
S3 (AVG)
DMX=0.084 044
SMN=-0.115E+08
SMX=709 363



-0.115E+08 -0.881E+07 -0.609E+07 -0.337E+07 -650 366
-0.102E+08 -0.745E+07 -0.473E+07 -0.201E+07 709 363

NODAL SOLUTION

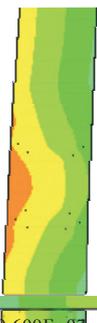
STEP=1
SUB=1
TIME=1
S3 (AVG)
DMX=0.084 044
SMN=-0.115E+08
SMX=709 363



-0.115E+08 -0.881E+07 -0.609E+07 -0.337E+07 -650 366
-0.102E+08 -0.745E+07 -0.473E+07 -0.201E+07 709 363

NODAL SOLUTION

STEP=1
SUB=1
TIME=1
S3 (AVG)
DMX=0.084 044
SMN=-0.115E+08
SMX=709 363



-0.115E+08 -0.881E+07 -0.609E+07 -0.337E+07 -650 366
-0.102E+08 -0.745E+07 -0.473E+07 -0.201E+07 709 363

图4 工况1作用下索塔第三主应力云图(单位:Pa)

(见图 5~8)。由图 5~8 可知:工况 1 作用下,沿路径 A 的第一主应力最大发生在 37.314 m 处(下横梁附近),第三主应力最大发生在 24.876 m 处(下横梁附近);沿路径 B 的第一主应力最大发生在 74.628 m 处(上横梁附近),第三主应力最大发生在 16.584 m 处(塔底附近);沿路径 C 的第一主应力最大发生在 29.022 m 处(下横梁附近),第三主应力最大发生在 29.022 m 处(下横梁附近),

第三主应力最大发生在塔底部附近。

3.2.2 工况 1+温差 I 作用结果

图 9、图 10 为工况 1+温差 I 作用下索塔第一、第三主应力云图。由图 9、图 10 可知:在工况 1+温差 I 作用下,在外侧温度高于内侧温度时,索塔外表

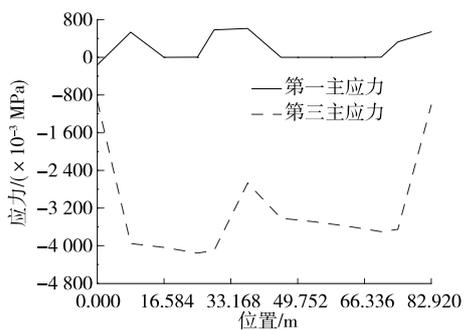


图 5 工况 1 作用下路径 A 应力图

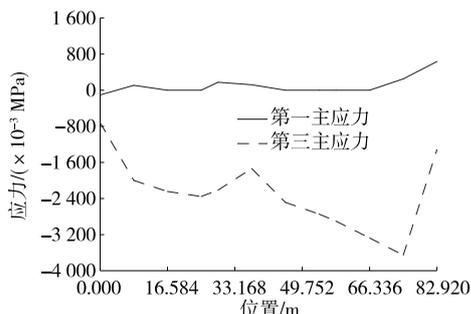


图 6 工况 1 作用下路径 B 应力图

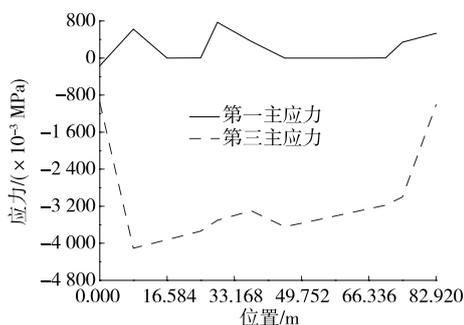


图 7 工况 1 作用下路径 C 应力图

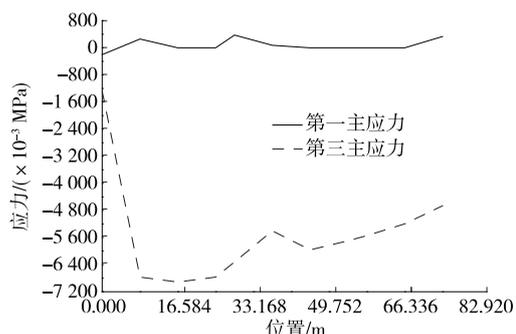


图 8 工况 1 作用下路径 D 应力图

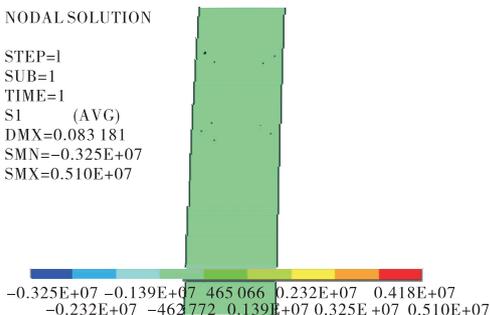
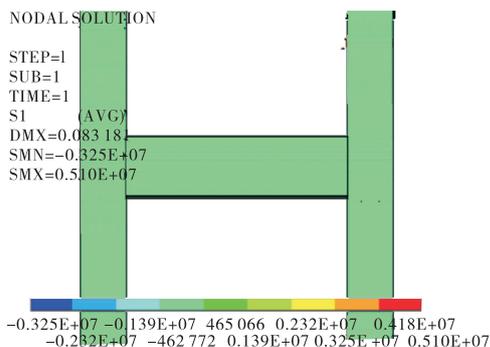
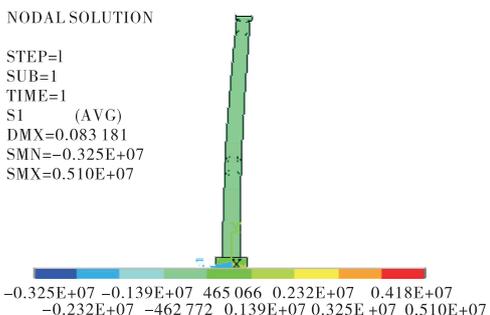
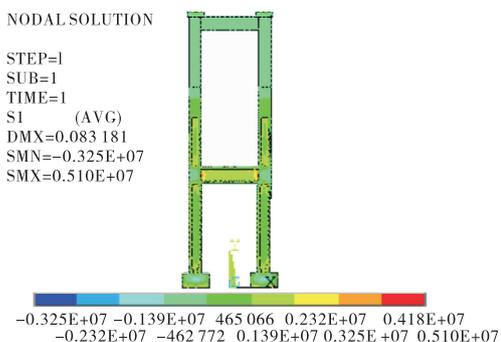


图 9 工况 1+温差 I 作用下索塔第一主应力云图(单位:Pa)

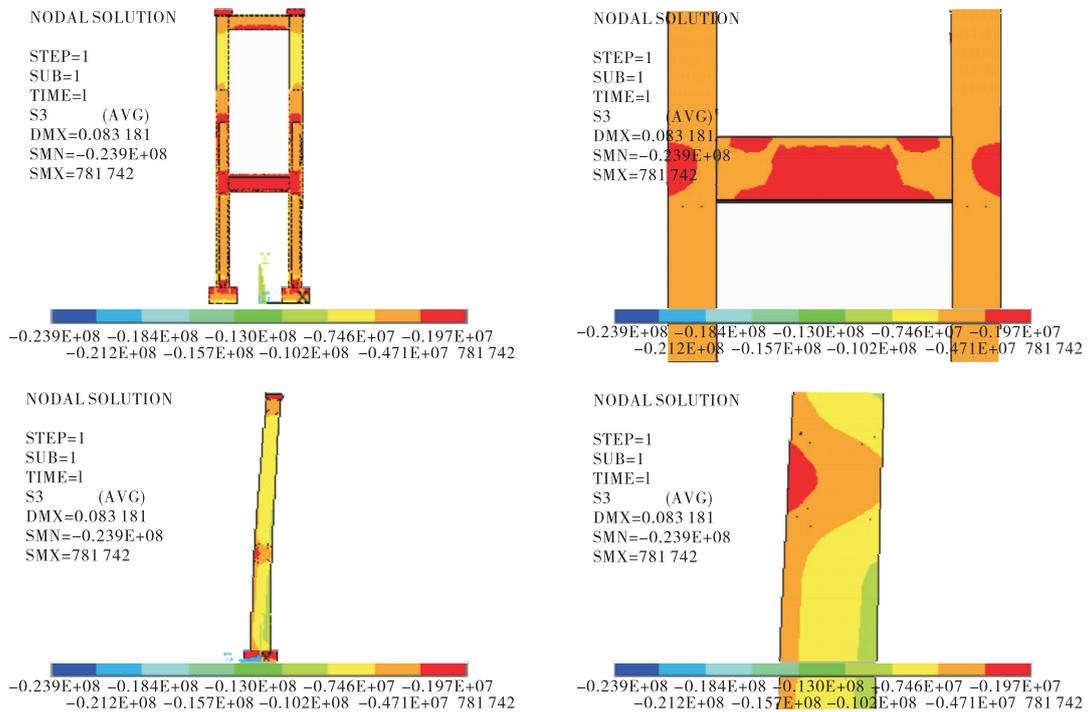


图 10 工况 1+温 I 作用下索塔第三主应力云图(单位:Pa)

面的拉应力不仅没有增加,反而有所减少。可见,外高内低的温差对索塔产生一个“紧箍力”,使索塔结构处于三向应力状态,对结构有利。

工况 1+温差 I 作用下桥塔结构应力路径见图 11~14。由图 11~14 可知:工况 1+温差 I 作用

下,沿路径 A 的第一主应力均较小,第三主应力最大发生在塔底部附近;沿路径 B 的第一主应力大多数表现为压应力且都较小,第三主应力最大发生在塔底部附近;沿路径 C 的第一主应力均较小,第三主应力最大发生在塔底部附近;沿路径 D 的第一主

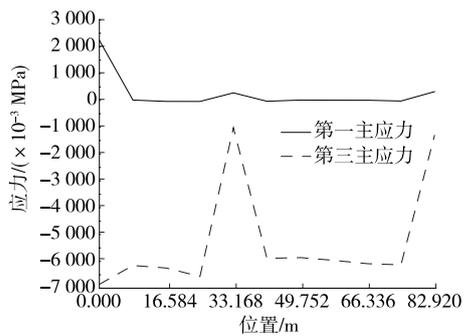


图 11 工况 1+温差 I 作用下路径 A 应力图

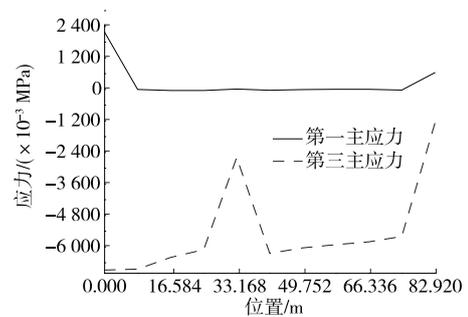


图 13 工况 1+温差 I 作用下路径 C 应力图

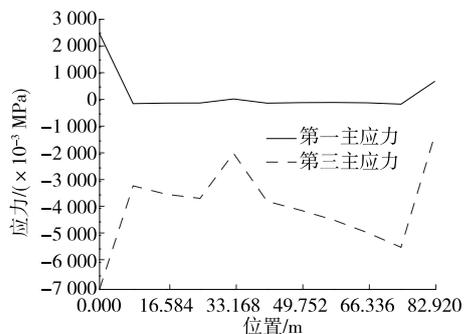


图 12 工况 1+温差 I 作用下路径 B 应力图

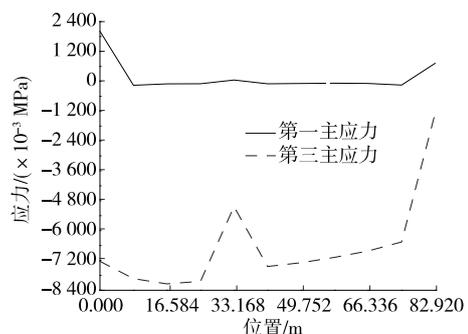


图 14 工况 1+温差 I 作用下路径 D 应力图

应力大多数表现为压应力且都较小,第三主应力最大发生在塔底部附近。

3.2.3 工况 1+温差 II 作用结果

图 15、图16为工况1+温差 II 作用下索塔第

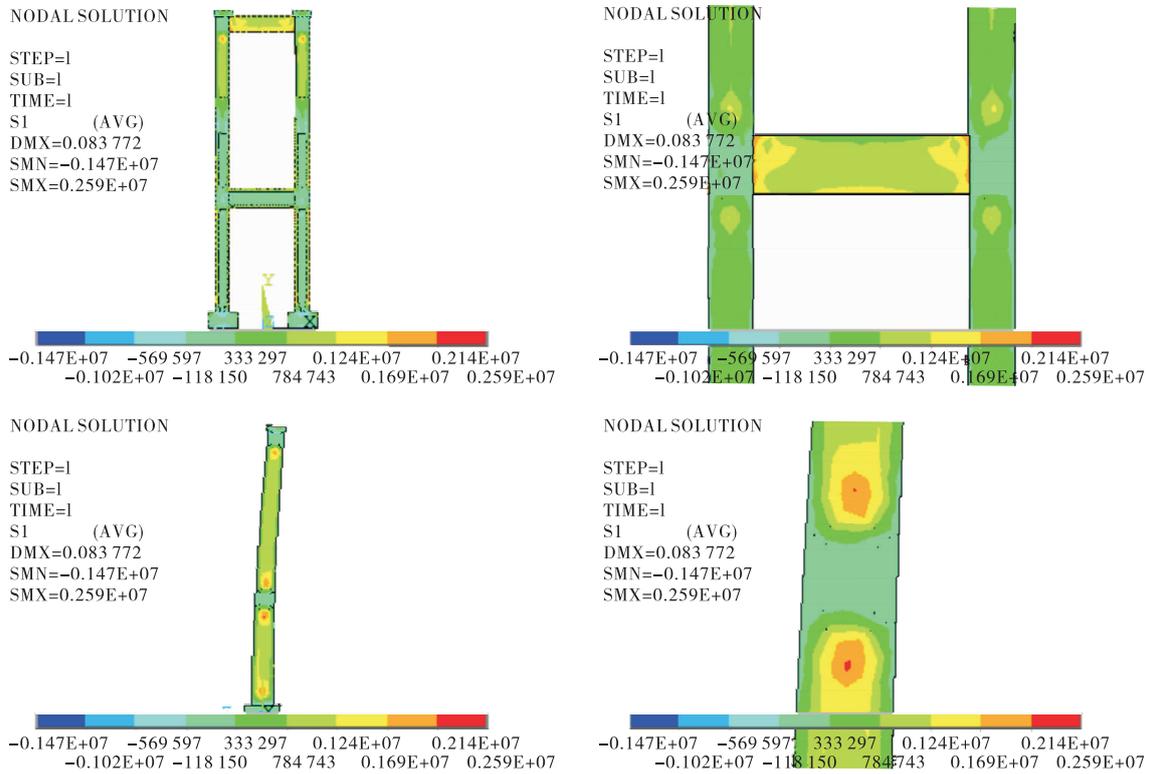


图 15 工况 1+温差 II 作用下索塔第一主应力云图(单位:Pa)

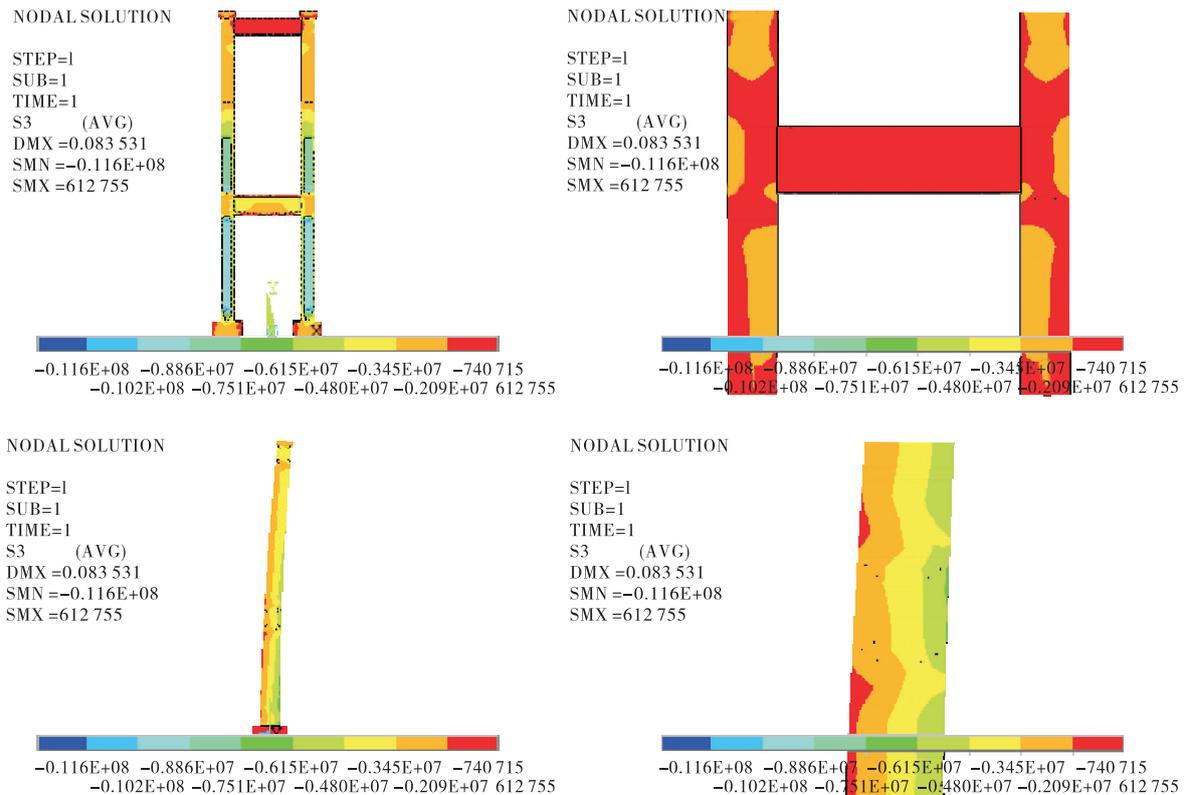


图 16 工况 1+温差 II 作用下索塔第三主应力云图(单位:Pa)

一、第三主应力云图。由图 15、图 16 可知:工况 1+温差 II 作用下,温差为 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,索塔侧面中心的拉应力均已超过砣的抗拉强度设计值,侧面中心应力值大于正面中心应力值。

工况 1+温差 II 作用下桥塔结构应力路径见图 17~20。由图 17~20 可知:沿路径 A 的第一主应力最大发生在 37.314 m 处(下横梁附近),且附近应力值均已超过 30 号砣抗拉强度设计值(1.75 MPa);第三主应力最大发生在 24.876 m 处。沿路径 B 的第一主应力最大发生在 74.628 m 处(上横梁附近),第三主应力最大发生在 74.628 m 处(上横梁附近)。沿路径 C 的第一主应力最大发生 29.014 m 处,且附近应力值均已超过 30 号砣抗拉强度设计值;第三主应力最大发生在塔底部附近。沿路径 D 的第一主应力最大发生在 74.628 m 处,第三主应力最大发生在塔底部附近。

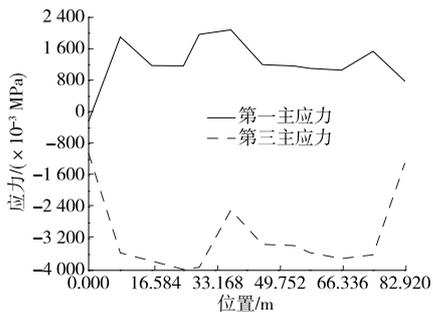


图 17 工况 1+温差 II 作用下路径 A 应力图

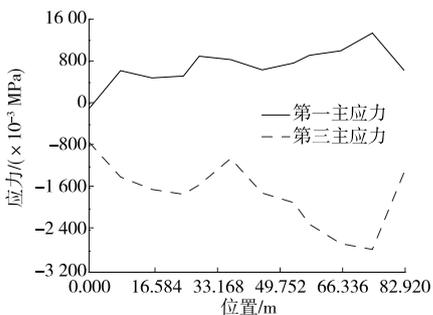


图 18 工况 1+温差 II 作用下路径 B 应力图

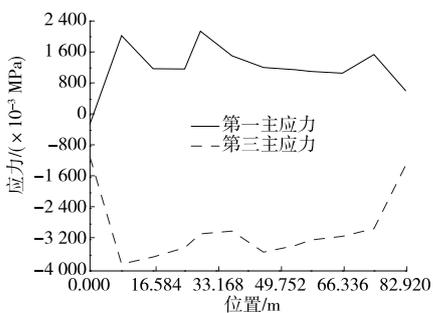


图 19 工况 1+温差 II 作用下路径 C 应力图

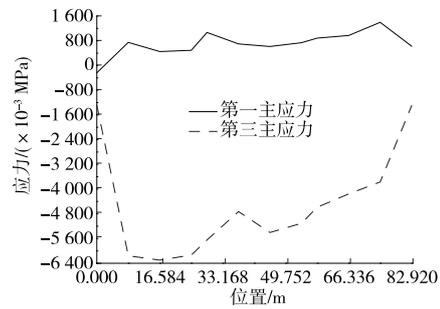


图 20 工况 1+温差 II 作用下路径 D 应力图

4 结论

(1) 在恒载、活载及砣收缩徐变共同作用下,由于砣具有泊松比的关系,在砣发生纵向应变时也发生横向应变,使索塔侧面(背横梁处)出现较大拉应力(0.9 MPa)。

(2) 在相同温差条件下,沿塔高方向,索塔侧面下部(下横梁附近)的第一主应力略高于上部第一主应力,即同一工况下索塔侧面下部产生裂缝的概率及裂缝大小高于上部。

(3) 在外侧温度高于内侧温度时,索塔外表面的拉应力较恒、活载而言有所减少。外高内低的温差对索塔产生一个“紧箍力”,使索塔结构处于三向应力状态,对结构有利。

(4) 内外温差对结构影响很大,特别是当温度内高外低时,在结构外表面产生的拉应力较大,会导致砣开裂。

参考文献:

- [1] 李传习.现代悬索桥静力非线性理论与实践[M].北京:人民交通出版社股份有限公司,2014.
- [2] 中交公路规划设计院有限公司.公路桥涵设计通用规范:JTG D60-2015[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2015.
- [3] 任翔,佟阳,何青,等.薄壁箱形混凝土桥塔温度应力场分析[J].广西大学学报(自然科学版),2011,36(1):121-127.
- [4] 陈定市,胡大琳,胡伟.混凝土桥塔日照温度效应分析[J].兰州理工大学学报,2016,42(3):143-149.
- [5] 曾欢胜.大跨度悬索桥混凝土索塔的施工控制及非荷载效应分析[D].西安:长安大学,2008.
- [6] 唐茂林.大跨度悬索桥空间几何非线性分析与软件开发[D].成都:西南交通大学,2003.