

DOI: 10.7672/sjgs2025020058

大跨度钢网壳卸载过程温度响应模拟与实测研究^{*}

王金荣¹, 王秀丽^{2,3}, 赵晨晟¹, 罗晓舟^{2,3}, 张琦明¹, 苟宝龙^{2,3}(1. 甘肃建投土木工程建设集团有限责任公司, 甘肃 兰州 730070; 2. 兰州理工大学
土木工程学院, 甘肃 兰州 730050; 3. 西部土木工程防灾减灾教育部工程
研究中心, 甘肃 兰州 730050)

[摘要] 对于常出现大温差、骤降温度、太阳辐射等特殊环境的沙漠地区, 强温度作用对处于施工阶段的空间结构产生较大影响。以民勤文体中心体育馆网壳卸载过程为例, 运用支座位移法模拟分析双层网壳卸载施工过程, 并对卸载过程中结构不同边界条件及不同温度作用进行参数化分析, 同时结合健康监测的温度、应力及变形数据, 分析温度效应对结构卸载阶段的影响。结果表明, 太阳辐射作用和边界约束条件的改变会直接影响卸载过程中应力变化规律, 固定约束下仅考虑自重的卸载应力仅为温度应力的 10%~30%; 在实际施工过程中, 大跨度钢结构考虑温度影响的模拟值更趋近实测值, 需考虑特殊温度环境对结构力学性能的影响。

[关键词] 钢结构; 网壳; 卸载; 模拟; 监测; 温度效应; 结构响应

[中图分类号] TU391

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2025)02-0058-07

Simulation and Experimental Research on Temperature Response of Large-span Steel Reticulated Shell During Unloading

WANG Jinrong¹, WANG Xiuli^{2,3}, ZHAO Chensheng¹, LUO Xiaozhou^{2,3},
ZHANG Qiming¹, GOU Baolong^{2,3}

(1. Gansu Construction Investment Civil Engineering Construction Group Co., Ltd., Lanzhou, Gansu 730070, China; 2. School of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou, Gansu 730050, China; 3. Western Research Center of Disaster Mitigation in Civil Engineering Ministry of Education, Lanzhou, Gansu 730050, China)

Abstract: For desert areas where special environments such as large temperature differences, sudden temperature drops, and strong solar radiation often occur, the strong temperature effect will have a significant impact on the spatial structure during the construction phase. Taking the unloading process of the reticulated shell of Minqin Sports Center Gymnasium as an example, the support displacement method is used to simulate and analyze the unloading construction process of the double-layer reticulated shell, and parametric analysis of different boundary conditions and different temperature effects of the structure during the unloading process is carried out. At the same time, combined with the temperature, stress and deformation data of health monitoring, the impact of temperature effects on the unloading stage of the structure is analyzed. The results indicate that the effect of solar radiation and changes in boundary constraints directly affect the stress variation law during the unloading process. Under fixed constraints, the unloading stress considering only self weight is only 10% ~ 30% of the temperature stress. In actual construction, the calculated value of large-span steel structure considering temperature effect is closer to the measured value, and the influence of special temperature environment on structural mechanics performance needs to be considered.

Keywords: steel structures; reticulated shell; unloading; simulation; monitoring; temperature effect; structural response

^{*} 国家自然科学基金(51778273); 甘肃省住房和城乡建设厅建设科技项目(JK2020-26)

[作者简介] 王金荣, 工程师, E-mail: 530364052@qq.com

[通信作者] 王秀丽, 教授, 博士生导师, E-mail: 135739056@qq.com

[收稿日期] 2024-03-20

0 引言

随着一批批大跨度空间结构不断涌现,结构形式正日益向着多样化、特殊化和复杂化方向发展。由于复杂空间结构本身形式特殊,其施工过程难度系数较高且不可控因素多(结构体系、荷载、刚度及边界条件等因素的不断变化)^[1-2]。此外,温度作用作为大型复杂大跨度钢结构施工阶段的主控荷载,考虑到其施工周期较长,结构在施工过程中与外界环境直接接触,并且在施工阶段结构内力不断发生重新分布,若此时结构遭遇极端温度条件(极端低温、强太阳辐射及强冷空气骤然降温的特殊环境),将可能造成不可预估的安全隐患^[3-5]。大跨度空间结构施工分析及监测技术对保证施工过程顺利进行具有重要意义。国内外诸多学者对大跨度空间结构施工过程及温度效应做了大量研究工作。王秀丽等^[6]采用 MIDAS Gen 有限元软件对管桁架滑移施工、单层网壳安装及张拉索施工全过程进行分析。陈志华等^[7]以某钢屋盖整体提升施工过程为例,探究监测技术在施工过程中的应用及温度效应对施工过程的影响。常乐等^[8]对大跨度钢屋盖卸载过程进行数值模拟及监测研究,分析温度作用对钢结构施工过程的影响。刘哲等^[9]研究摩天轮钢结构施工过程中温度对结构应力和变形的影响。

目前,关于大跨度钢结构在施工过程中的温度效应研究相对较少。本文运用支座位移法模拟网壳结构卸载施工过程,并进行参数化分析,研究不同边界条件和不同温度作用对结构的影响。同时,结合实时监测的温度、应力及变形数据,分析温度效应对结构卸载阶段的影响。

1 工程概况

1.1 项目概况

民勤文体中心体育馆位于甘肃省民勤县,体育馆底部为3层钢筋混凝土框架结构,三维模型如图1所示,屋盖采用带有螺栓球节点的双层网壳结构,投影呈圆形,投影面积为3 629.84m²,北侧周边采用下弦支承,南侧周边采用上弦支承。网壳最大跨度为72.8m,裙边最大悬挑长度为5.7m,主体结构杆件材质均为Q355C,南侧高、北侧低,网壳中心上弦顶标高为22.500m。

民勤县地处大陆性沙漠气候区,东、西、北三面被巴丹吉林沙漠和腾格里沙漠包围,沙漠性气候特征明显,主要表现为冬冷夏热、昼夜温差大、年温差大、太阳辐射强且持续时间长等特点。最低气温为-29.5℃,最高气温为41.7℃,平均气温年较差31.8℃,平均气温为8.2℃。

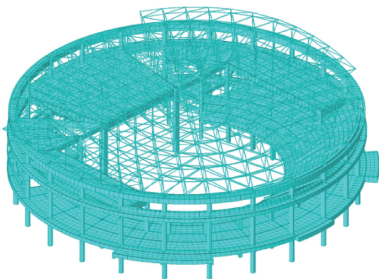


图1 体育馆三维模型

Fig. 1 Three-dimensional model of gymnasium

1.2 卸载方案

钢网壳共布置10个支撑胎架,编号为1~10号,其中1~4号为砂箱支撑,5~10号为液压千斤顶支撑,支撑胎架布置如图2所示。采用分步分级卸载,第1步卸载5~10号支撑胎架,分为2级,每级卸载5mm;第2步卸载1~4号支撑胎架,分为4级,前3级每级卸载15mm,最后1级进行完全卸载,共分为6个卸载步。支撑胎架位置如图2a所示,永久支座采用橡胶支座,如图2b所示。卸载步说明如表1所示。

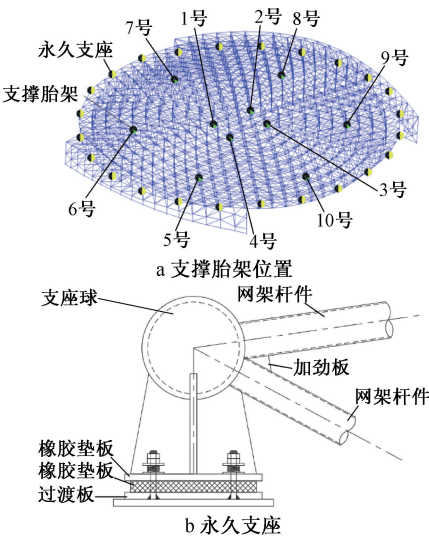


图2 支撑胎架及支座位置

Fig. 2 Position of support bed-jigs and supports

表1 卸载步说明

Table 1 Description of unloading steps

卸载步编号	卸载名称	具体说明
1	第1步第1级卸载	5~10号支撑胎架卸载5mm
2	第1步第2级卸载	5~10号支撑胎架卸载5mm
3	第2步第1级卸载	1~4号支撑胎架卸载15mm
4	第2步第2级卸载	1~4号支撑胎架卸载15mm
5	第2步第3级卸载	1~4号支撑胎架卸载15mm
6	第2步第4级卸载	1~4号支撑胎架完全卸载

2 施工监测方案

2.1 监测设备选取

采用振弦式应变计和高精度全站仪,对结构应变及位移进行实时监测,然后考虑到环境温度作用对结构的影响,选用振弦式应变计及高精度红外测温枪对杆件温度进行采集。卸载阶段通过综合采集模块进行实时监测。

2.2 测点布置

1)位移测点位置包括:①变形较大位置。依据各卸载步模拟结果,选取变形较大位置进行监测。②支撑位置。结构安装、卸载等施工过程中可能会发生整体失稳,应对支座和临时支撑处水平位移和竖向位移进行实时监测。位移测点共 12 个,如图 3 所示。

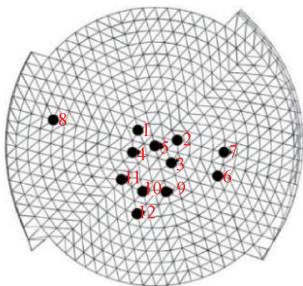


图 3 位移测点布置

Fig. 3 Layout of displacement measuring points

2)应力测点位置包括:①受力较大杆件。监测模拟结果中受力较大的杆件实时应变。②支撑附近杆件。卸载时由于约束条件的影响,可能导致杆件应力突变,故需对支撑处杆件进行监测。③关键杆件。结构中的主要受力杆件和轴力、弯矩及剪力等共同作用下的复杂杆件,该部分杆件在结构中发挥重要作用,受力复杂,为确保卸载过程的安全性,应进行实时监测。应力测点共 36 个,包括 13 个上弦杆测点,用 S 表示;13 个下弦杆测点,用 X 表示;10 个腹杆测点,用 F 表示,如图 4 所示。

3 数值模拟分析

3.1 有限元模型

在施工过程中,网壳结构受力不同于设计状态,拆除支撑胎架会使结构受力状态不断发生变化,并导致内力重分布。此外,由于网壳结构采用砂箱和液压千斤顶进行支承,2 种临时支撑卸载方式不同,可能给结构卸载带来不利影响,应对卸载阶段进行数值模拟分析,逐步分析每个卸载阶段力学特性。边界约束条件为大跨空间结构施工过程中力学特性的主要影响因素之一,而在实际施工过程中,支座约束刚度难以确定,在拆除临时支撑过

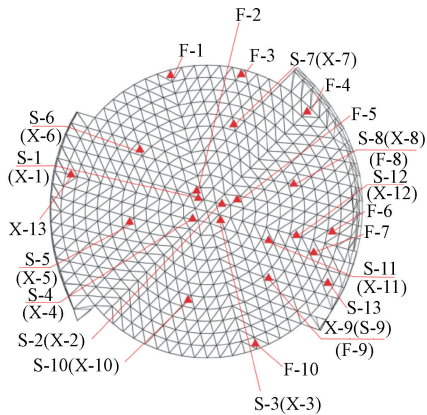


图 4 应力测点布置

Fig. 4 Layout of stress measuring points

程中,不同约束形式和约束刚度直接影响卸载时内力、变形及结构温度响应。因此,进行施工过程模拟和温度效应研究时,边界条件的确定成为结构施工分析中关键性问题。

采用 MIDAS Gen 有限元软件对结构进行分析。杆件使用 Q355C 圆钢管,并采用梁单元进行模拟,计算模型如图 5 所示(图中标红位置为应力监测杆件)。由于与设计阶段不同,实际施工中的支座刚度不易确定,这也是卸载阶段实测值与模拟值出现偏差的重要原因之一。为了解不同边界条件下网壳卸载阶段结构响应,将支座简化为固定铰支座和弹性铰支座(水平刚度为 3 000kN/m),临时支撑仅约束竖向位移。

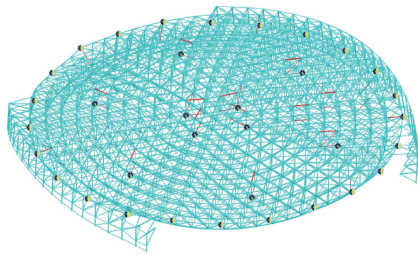


图 5 计算模型

Fig. 5 Calculation model

3.2 荷载取值分析

为考虑温度作用对施工阶段的影响,荷载取为自重及温度荷载。大跨度钢屋盖温度作用一般包括:①年温度作用引起整体结构均匀温度变化,即均匀温度作用;②太阳辐射引起结构不同区域、杆件不同位置的差异升温,即非均匀温度作用。

根据 GB 50009—2012《建筑结构荷载规范》^[10]规定,考虑到金属结构对气温变化较敏感,必要时应对基本气温进行修正。修正后的基本最高温度 $T_{\max+}=41^{\circ}\text{C}$,基本最低温度 $T_{\max-}=-30^{\circ}\text{C}$ ^[11]。均匀温度作用取值如式(1),(2)所示。

$$T_u = T_{\max} - (T_0 - \Delta T) \tag{1}$$

$$T_d = T_{\max} - (T_0 + \Delta T) \tag{2}$$

合龙温度(初始温度) $T_0 \pm \Delta T$ 接近年平均气温,并预留一定温度偏差 ΔT ,合龙温度取为 $8^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ 。根据式(1),(2),均匀温升 $T_u = 35^{\circ}\text{C}$,均匀降温 $T_d = -40^{\circ}\text{C}$ 。

在太阳辐射作用下,由于空间结构杆件错综复杂,存在阴影遮挡,导致上弦杆与腹杆、下弦杆产生较大温差(见表2)。上弦杆与腹杆、下弦杆温差可达 15°C 以上,故取上弦杆与腹杆、下弦杆温差为 20°C ,腹杆与弦杆温升和均匀温升 T_u 相同,则在太阳辐射下,上弦杆最高温升为 55°C ,腹杆和下弦杆最高温升取 35°C 。

表 2 温度作用取值说明

Table 2 Description of temperature effect value		
温度荷载 工况	荷载名称	具体说明
1	均匀升温	上弦杆、腹杆及下弦杆均升温 35°C ($+35^{\circ}\text{C}$)
2	均匀降温	上弦杆、腹杆及下弦杆均降温 40°C (-40°C)
3	太阳辐射作用	上弦杆升温 55°C ($+55^{\circ}\text{C}$), 腹杆及下弦杆升温 35°C ($+35^{\circ}\text{C}$)

3.3 应力对比分析

为全面了解不同温度作用和不同边界条件下网壳卸载阶段结构响应,对比分析3种极端温度作用和2种边界条件对应力的影响。选取12个关键测点进行对比分析,其中,上弦杆、腹杆及下弦杆测点各取4个,即S-3,S-8,S-10,S-12,X-1,X-5,X-6,X-11,F-1,F-2,F-3,F-4。弹性约束下卸载阶段杆件应力变化曲线如图6所示,固定约束下卸载阶段杆件应力变化曲线如图7所示。由图6,7可知:

1)图6a,7a均为仅考虑自重作用下卸载阶段杆件应力变化,随着卸载步增加,相邻卸载步间最大应力差为 32.9MPa ,出现在固定约束下杆件F-2卸载步3,4间,且杆件应力变化平稳,说明卸载方案较

合理。弹性约束下杆件最大应力为 -77.8MPa ,固定约束下杆件最大应力为 -73.7MPa ,且均为与支座直接相连的杆件F-2;不考虑温度作用时,固定约束和弹性约束下关键杆件应力变化规律相似。

2)图6b,7b反映了高温作用下卸载过程中杆件应力变化。对比图6a,6b,发现弹性约束下不考虑温度作用与考虑均匀升温的应力变化规律相似,二者各卸载步下关键杆件应力相差在30%以内。在弹性约束下,结构能产生一定水平位移,使杆件温度应力得到释放。而在固定约束下考虑均匀温升与弹性约束下不考虑温度作用的应力变化存在明显差异。在固定约束且考虑温升下,杆件F-2应力在卸载步5出现峰值,应力为 311.0MPa ,已达屈服强度的88%,且部分杆件应力突变明显。究其原因,主要是结构在固定约束下无法产生水平位移,杆件受热胀冷缩作用后产生较大温度应力。

3)高温作用时,网壳结构发生跨中向上膨胀变形,相当于对自重的削减作用。如图6b,6d所示,弹性约束下部分杆件应力较图6a略有减小;而固定约束下部分杆件应力较图7a有明显增大。其原因为:考虑温度作用时,弹性约束下杆件温度应力小于仅考虑自重下的卸载应力,温度应力抵消部分卸载应力,使杆件应力减小,固定约束下杆件温度应力较大,温度应力抵消完卸载应力后反向增大,致使部分杆件应力由正变负或由负变正。

4)由图6c可知,在弹性约束下,降温作用与不考虑温度作用的应力变化趋势仍无显著差别。低温时网壳结构发生跨中向下收缩变形,相当于对自重的“促进”作用,使部分杆件应力较图6a略有增大。对比图7a,7c可知,应力变化规律与应力值均有明显不同,固定约束下杆件最大应力为 237.0MPa ,杆件F-2在卸载步5,6间产生 132.1MPa 的应力突变,且杆件S-10,F-4等相较于不考虑温度作用时受力状态发生变化,杆件S-10由负应力变为

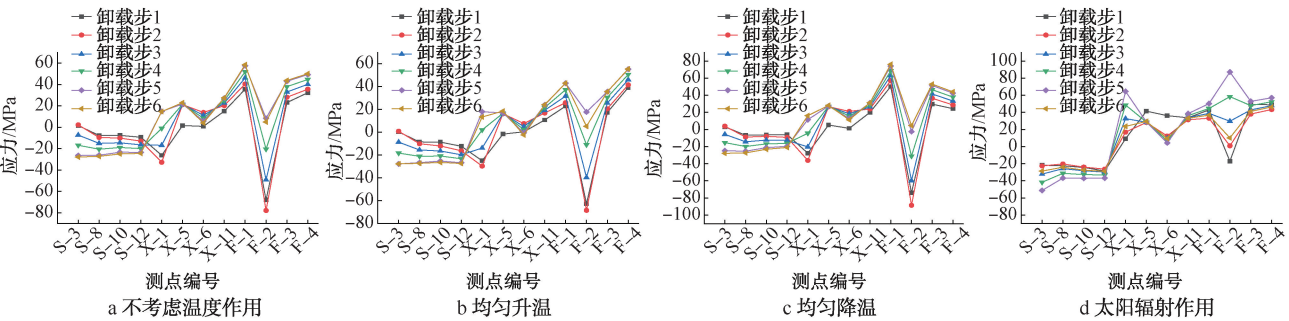


图 6 弹性约束下卸载阶段杆件应力变化曲线

Fig. 6 Stress changing curves of components in unloading stage under elastic constraint

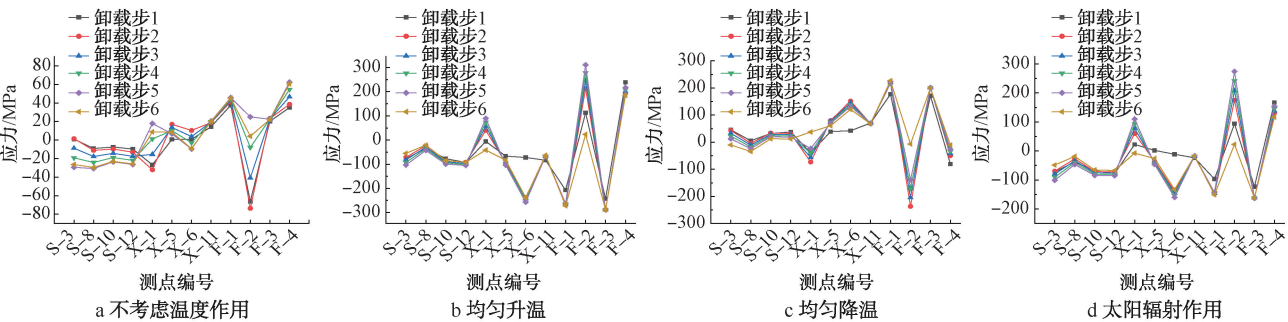


图 7 固定约束下卸载阶段杆件应力变化曲线
Fig. 7 Stress changing curves of components in unloading stage under fixed constraint

正应力,杆件 F-4 由正应力变为负应力。固定约束下杆件温度敏感性较高,在卸载阶段,产生受力状态不均匀、应力突变等不安全因素。

5)相较于均匀升温,太阳辐射所引起的结构非均匀温度作用更复杂,在卸载过程中应力也较多变。在卸载阶段考虑太阳辐射作用时,由于上弦层与下弦层升温不同,其卸载应力与不考虑温度作用、均匀升温作用时有显著差异。在固定约束下,太阳辐射作用产生较大温度应力,部分杆件受力状态发生变化,由图 7d 可知,杆件 F-2 在卸载步 5 应力达最大值,为 274.0MPa,对比不考虑温度作用,杆件 F-2 在卸载步 1 应力达最大值,为-66.2MPa,这说明部分杆件温度应力已远超过卸载应力。

6)在考虑温度作用的卸载过程模拟中,部分杆件在温度作用下的应力变化始终较小,说明不同杆件温度敏感性有差异,杆件 F-2 温度敏感性最高,杆件 X-11 温度敏感性最低。太阳辐射作用和固定约束下的温度作用会直接影响卸载过程中杆件应力变化规律,特别是在固定约束下,仅考虑自重的卸载应力远小于温度应力,为温度应力的 10%~30%。在边界条件不能确定时,温度作用对结构施工过程的影响未知。因此,卸载前应充分考虑不利因素并进行计算。

4 实测数据与施工模拟对比分析

4.1 卸载日温度变化

钢网壳于 2022 年 8 月 23 日 09:00—17:30 卸载,环境温度较高,相较于结构安装温度,出现明显温差,对钢结构应力的影响较大。

通过传感器及高精度红外测温枪对卸载当日结构各区域各类杆件进行温度监测,杆件温度与气温对比如图 8 所示,当日最高气温为 32.1℃,出现在 16:00,而杆件最高温度相较于气温,有明显滞后性,17:00 时监测杆件最高温度约为 43.9℃,最低温度约为 36.2℃,杆件间最大温差约为 7.7℃,卸载

当日天气多云,太阳辐射影响较小,因此杆件间温差也相对较小。在卸载日,结构处于高温环境下,进行有限元模拟时,有必要考虑温度作用的影响,以减小实测值与模拟值的误差。进行温度作用取值讨论时,逐步考虑卸载过程中温度变化,建议计算分析时取杆件最高温度平均值作为荷载取值。

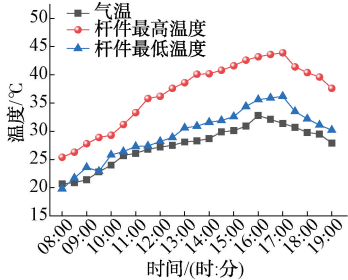


图 8 卸载日气温及杆件温度时程曲线
Fig. 8 Time-history curves of air temperature and component temperature on unloading day

4.2 卸载过程中应力结果对比

将卸载实测值与考虑温度作用下测点模拟值进行对比分析,选取杆件 S-3, S-8, S-13, X-1, X-5, X-12, F-1, F-2, F-3 进行 2 种模拟结果(考虑实测温度作用及不考虑温度作用)和实测应力值比较与误差分析。各杆件卸载过程中应力模拟值与实测值如图 9 所示。由对比分析可知:

1)在卸载过程中,杆件 F-2(1 号支撑胎架处腹杆)应力出现最大值,也是应力变化最大的杆件。卸载步 1,2 时杆件应力达-75.0MPa,在支撑胎架拆除过程中逐渐变小,最后趋近零杆状态,符合结构受力规律且满足卸载过程受力要求。

2)分析实测值与模拟值间误差原因:①复杂的卸载过程偶然扰动部分杆件应力;②结构安装基本安排在春季,温度作用相较于卸载过程偏低。由图 9 可知,杆件 S-3, S-8, X-1, F-1 实测值与模拟值吻合度较高,而其他实测杆件应力与不考虑温度作用的模拟值相差 10~20MPa,观察发现杆件在各卸载步

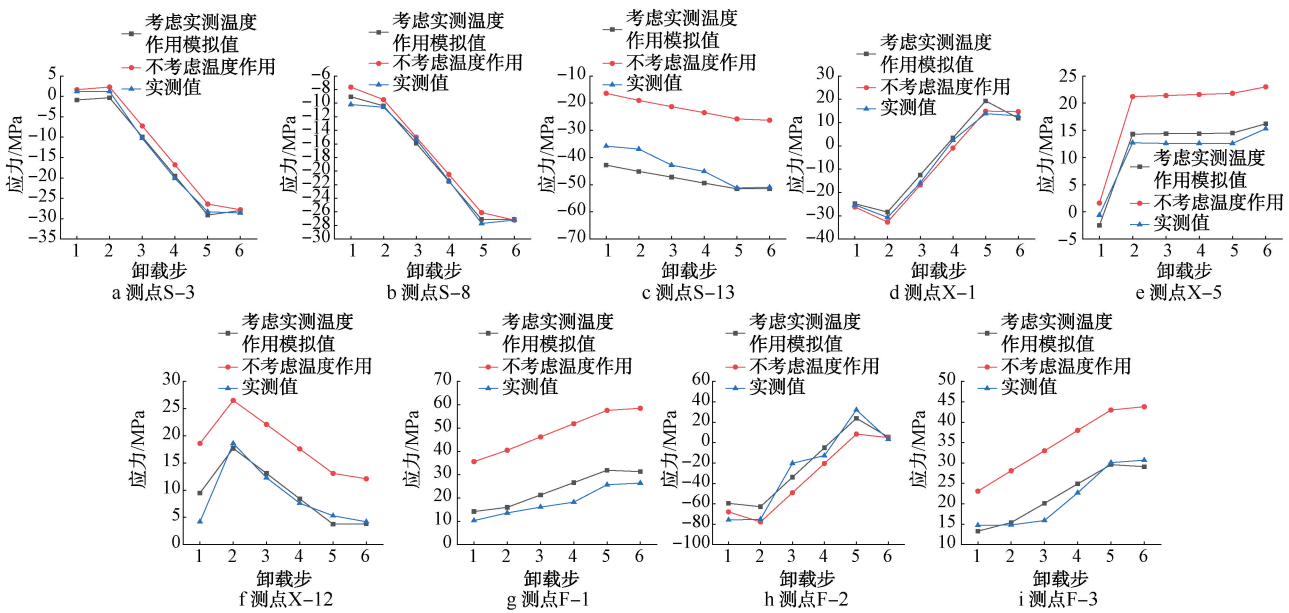


图 9 部分杆件应力实测值与模拟值对比

Fig. 9 Comparison of measured values and simulated values of stress for some components

的实测应力更接近考虑温度作用的模拟值,大部分杆件误差均在 20% 以内。这既证明了卸载模拟的准确性,又说明在较高温度作用下进行卸载时需考虑该影响进行误差分析,同时,在施工过程中,考虑温度变化影响对确保工程的安全性具有重要意义。

3) 杆件 S-3,S-8,X-1,F-1 应力实测值与模拟值较吻合,主要是因为杆件温度敏感度较低,结构中不同杆件边界约束条件存在差异,导致温度作用的影响不同。

4.3 卸载过程中变形结果对比

选取 12 个位移控制点进行卸载过程变形监测,位移实测值与模拟值如图 10 所示。由图 10 可知,结构卸载过程满足稳步下降、变形协调的卸载要求,各位移测点最大变形量与卸载方案计划的卸载量一致,同样,位移实测值与模拟值基本一致,吻合度较高。

对比图 10a~10c 可知,5 号测点位移最大,不考虑温度作用时模拟值达-55.7mm,考虑实测温度作用时模拟值为-50.1mm,而实测值为-48.0mm。因

此,温度作用对结构成型后的变形影响较小,考虑温度作用后最大卸载变形相对于不考虑温度作用小 5.6mm,这与前面提到的高温作用时结构发生跨中向上膨胀变形、相当于对自重的削减作用相对应。另外,由于模拟中考虑了结构自重放大效应以确保结构安全,位移实测值比模拟值略小,但误差均<20%,说明了模拟与监测方法的准确性,并能更好地为实际工程提供参考。

5 结语

1) 弹性约束下结构可产生一定水平位移,杆件温度应力在一定程度上得到释放,不考虑温度与考虑均匀温度变化的应力相近,应力变化规律相似。太阳辐射作用和边界约束条件的改变会直接影响卸载过程中应力变化规律,特别是在固定约束下,仅考虑自重的卸载应力远小于温度应力,仅为温度应力的 10%~30%。

2) 通过对比应力和位移模拟值与实测值发现,各卸载步杆件实测应力及变形更接近考虑实测温度的模拟值,大部分测点误差均在 20% 以内。这说

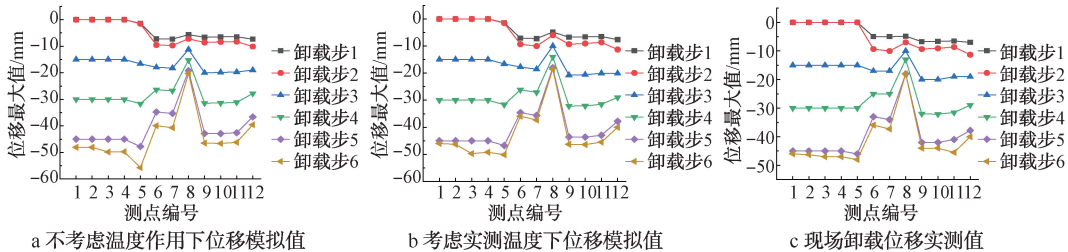


图 10 位移实测值与模拟值

Fig. 10 Measured values and simulated values of displacement

明在较强温度作用下进行卸载时需考虑该影响进行误差分析。

参考文献:

[1] 张君,王秀丽,毕贵权,等. 天水体育中心游泳馆网壳结构施工模拟分析与监测[J]. 建筑结构, 2020, 50(17): 34-39,33.
ZHANG J, WANG X L, BI G Q, et al. Construction simulation analysis and monitoring of steel reticulated shell structure of natatorium of Tianshui Sports Center [J]. Building structure, 2020,50(17):34-39,33.

[2] 佟克龙. 大跨度异形钢屋盖结构设计与施工关键技术[J]. 施工技术(中英文),2023,52(8): 51-54,60.
TONG K L. Key technology of structural design and construction of large-span special-shaped steel roof [J]. Construction technology,2023,52(8): 51-54,60.

[3] 赵中伟,陈志华,王小盾,等. 大跨度复杂钢结构温度效应及合拢温度研究[J]. 空间结构,2015, 21(2):40-45.
ZHAO Z W, CHEN Z H, WANG X D, et al. Study on temperature effect and closure temperature of large-span complex steel structure [J]. Spatial structures,2015,21(2):40-45.

[4] 赵中伟,陈志华,王小盾,等. 于家堡交通枢纽站房网壳施工仿真分析与监测[J]. 建筑结构学报, 2015,36(1):136-142.
ZHAO Z W, CHEN Z H, WANG X D, et al. Simulation analysis and monitoring of reticulated shell construction of Yujiapu Transportation Hub Station [J]. Journal of building structures, 2015,36(1): 136-142.

[5] 仝晓莉, 陈志华, 赵中伟, 等. 考虑施工影响的大跨度钢结构温度效应及敏感性研究[J]. 工业建筑, 2018, 48(8): 141-146.
TONG X L, CHEN Z H, ZHAO Z W, et al. Study on temperature effect and sensitivity of long-span steel structure considering construction influence [J]. Industrial construction, 2018,48(8):141-146.

[6] 王秀丽,冯竹君,任根立,等. 大型复杂体育馆钢结构施工过程模拟分析[J]. 北京交通大学学报, 2020,44(6):17-24.
WANG X L, FENG Z J, REN G L, et al. Simulation analysis of steel structure construction process of large complex gymnasium [J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2020,44(6):17-24.

[7] 陈志华,郭芳菲,刘红波,等. 安平县文化体育活动中心屋顶钢结构施工过程监测研究[J]. 空间结构,2022,28(3): 63-66,85.
CHEN Z H, GUO F F, LIU H B, et al. Research on construction process monitoring of roof steel structure of Anping County Cultural and Sports Activity Center [J]. Spatial structures, 2022,28(3):63-66,85.

[8] 常乐,李瑞峰,李志伟. 跨度 120m 三角锥体空间钢结构施工卸载监测技术研究[J]. 建筑结构学报, 2020,41(2):142-148,165.
CHANG L, LI R F, LI Z W. Research on construction unloading monitoring technology of triangular pyramid space steel structure with a span of 120m [J]. Journal of building structures, 2020, 41(2): 142-148,165.

[9] 刘哲,严加宝,史奉伟. 白浪河无轴式摩天轮钢结构施工过程模拟与监控[J]. 建筑钢结构进展, 2020,22(4): 141-148.
LIU Z, YAN J B, SHI F W. Simulation and monitoring of the construction process of shaftless Ferris wheel steel structure in Bailang River [J]. Progress in steel building structures, 2020, 22(4): 141-148.

[10] 中国建筑科学研究院. 建筑结构荷载规范:GB 50009—2012 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社,2012.
China Academy of Building Research. Load codes for the design of building structure: GB 50009—2012 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012.

[11] 郭妍. 大跨度钢结构基本温度作用取值与温度效应研究[D]. 天津:天津大学, 2016.
GUO Y. Study on the basic temperature effect and temperature effect of long-span steel structure [D]. Tianjin: Tianjin University, 2016.