

基于参数化建模的鼎式桥塔应力监测数值模拟研究

彭 辉

上海城建市政工程(集团)有限公司 上海 200333

【摘要】：大跨径斜拉桥鼎式桥塔施工过程中受力复杂、影响因素繁多，依赖单点监测难以直观反映结构的整体应力状态变化。本文以兰原高速东坝头黄河特大桥鼎式桥塔为工程背景，在现场监测的基础上，采用参数化与自动建模脚本相结合的方法，快速建立了桥塔全过程应力场精细化有限元模型，实现了33个施工节段逐步成型及横撑分级顶推过程的精确模拟。利用塔柱关键截面布置的应变测点，获取施工全过程实测应力数据，并与有限元模拟结果进行对比验证。结果表明，两者在主动横撑顶推、节段自重累积等关键工况下吻合良好，验证了该建模方法的准确性与可靠性。该方法在保证监测精度的前提下，有效降低了现场监测成本，提高了监测效率，对桥梁健康监测和安全评估有益。

【关键词】：鼎式桥塔；应力状态；参数化建模；健康监测

DOI:10.12417/3083-5526.25.07.018

引言

桥塔结构作为斜拉桥的主要承载部件，其施工精度控制对整个桥梁的承载性能和安全性具有至关重要的影响^[1-2]。桥塔在施工过程中涉及节段浇筑、横撑顶推、模板爬升等一系列工序，结构受力状态复杂多变，准确掌握其应力分布是保障施工安全的关键^[3]。因此，开展桥塔施工全过程应力监测，对于控制结构受力状态、指导施工决策具有重要意义^[4]。

然而，目前桥梁施工应力监测主要依靠离散式应变传感器获取关键截面的实测数据^[5]。其受传感器数量和布设位置限制，监测数据仅能反映有限点位的受力情况，难以全面把握结构的整体应力分布。若要通过加密布点获取更全面的信息，在实际施工中面临诸多现实难题：一是大跨径斜拉桥桥塔属于超高结构，在高空作业环境下密集布设传感器，不仅施工难度大、成本高昂，还存在较大的安全风险；二是传感器数量过多会与其他桥塔施工工序相互干扰，影响正常施工节奏^[6]。因此，仅依靠现场监测手段，在兼顾施工安全、成本控制和数据全面性之间难以取得平衡，亟需寻求更为经济高效的替代方法^[7]。

近年来，桥梁结构健康监测与有限元相结合的研究思路逐渐受到重视。通过有限元模拟能够获取桥塔结构全场的应力分布，弥补离散监测数据空间覆盖不足的局限，并可通过三维可视化直观呈现各部位受力状态。Zhong等^[8]基于有限元模型更新和健康监测技术，提出了斜拉桥温度场数字集成方法，通过结构热分析和数值模拟技术，利用有限实测温度数据建立了全桥完整的模拟温度场，实现了监测数据的空间扩展，弥补了离散测点信息不足的局限。Zheng^[9]针对无背索斜拉桥，采用有限元模拟结合现场监测的方法，建立了施工过程监控体系，通过实时对比模拟结果与实测数据，实现了对结构应力状态的动态评估。然而，传统手工建模方式存在建模周期长、参数调整繁琐、多工况计算不便等问题，一定程度上提高了有限元模拟的上手门槛，限制了其工程应用效率。参数化建模与自动化脚本技术的引入，为解决上述问题提供了有效手段。Fan等^[10]基于

代理模型提出了青马大桥桥塔有限元模型更新方法，通过参数化建模和优化算法，显著提高了模型修正效率，使模拟结果与实测动力特性吻合度提高了15%。通过参数化建模结合自动建模脚本，桥塔的几何尺寸、节段划分、横撑位置等关键参数可快速调整，为多工况批量计算提供了灵活的技术支撑。通过参数化建模结合自动建模脚本，桥塔的几何尺寸、节段划分、横撑位置等关键参数可快速调整，为多工况批量计算提供了灵活的技术支撑。

基于上述背景，本文以兰原高速东坝头黄河特大桥鼎式桥塔为工程背景，开展施工全过程应力监测与有限元模拟的对比分析研究。通过在塔柱关键截面布设应变测点，获取施工全过程实测应力数据；同时建立应力场精细化有限元模型，模拟节段逐步成型及横撑分级顶推过程。将监测结果与仿真结果进行对比，验证模型的准确性，评估结构安全，以期为同类桥梁施工控制提供参考。

1 桥塔应力监测方案

1.1 工程背景

兰原高速黄河大桥主桥采用三塔双索面半漂浮体系钢与混凝土组合梁斜拉桥(140m+360m+360m+140m=1000m)，索塔采用鼎式桥塔。由塔座、下塔柱、下横梁、中塔柱、中横梁、上横梁、上塔柱七部分组成，桥塔结构如图1所示。

桥塔塔高为154.3m，均采用单箱单室截面，其中下塔柱高30.9m，采用变截面设计，横桥向宽7.5-9m，顺桥向宽8-9m，壁厚为1.6m，横桥向塔柱内侧轮廓线斜率为1:3.932，外侧轮廓线斜率为1:5，顺桥向塔柱轮廓斜率为1:57.8。中塔柱高72.2m，采用60变截面设计横桥向宽5-7.301m，顺桥向宽7-8m，壁厚1m横桥向塔柱中心斜率为1:5.137，顺桥向塔柱斜率轮廓为1:144.41。上塔柱高51.2m，采用等截面设计横桥向宽5m，壁厚0.8m，顺桥向宽7m，壁厚1m。主动横撑根据施工设计图一共设置3道，其中1道采用可调主动横撑系统，另外2道采用

传统主动横撑，采用双 $\Phi 1000 \times 12\text{mm}$ 钢管，最下边横撑施加 2340KN（每根钢管 1170KN）主动预顶力，中间横撑施加 1630KN（每根钢管 815KN）主动预顶力，最上边横撑施加 2110KN（每根钢管 1055KN）主动预顶力。

主塔采用 C55 混凝土，承台采用 C40 混凝土。根据施工段的施工难度和施工单位的施工能力，主塔施工分为 33 个长度不同的施工段。

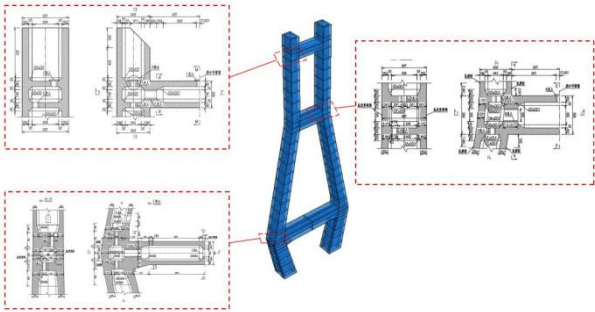


图 1 东坝头黄河大桥桥塔构造

1.2 应力监测方案

应力连续监测方案包括对桥塔、主动横撑、横梁等关键截面进行应变数据的采集，实现对桥塔状态的实时状态进行整体监测。对塔柱、横撑在施工全过程中的应力变化（主要为正应力）进行监测，尤其是关键工况下的拉应力，根据应力数据判断截面是否安全，并结合位移测量对塔内倾风险进行整体评估与预警。基于 1.1 节工程背景中桥塔构造尺寸以及横撑应力分布情况，塔柱沿高度设置 7 个测量截面，两侧塔柱均进行布置。如图 2 所示

采用在传统主动横撑的钢结构跨中截面安装应变测点的方法，监测传统主动横撑的受力状态。桥塔应变测点的总体布置方案见如图 3。

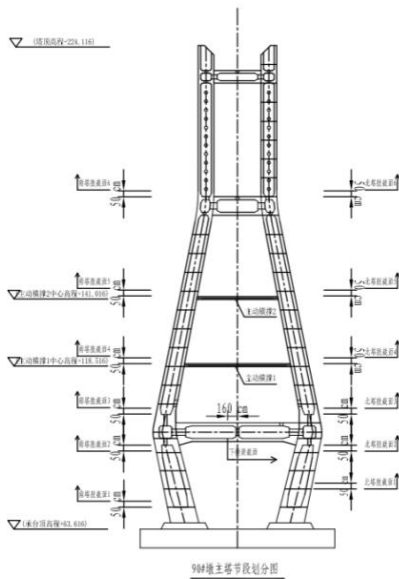


图 2 桥塔传感器总布置图

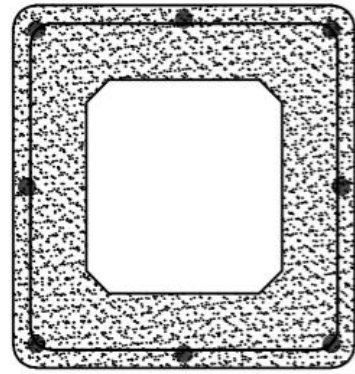


图 3 桥塔塔柱截面传感器分布

2 基于参数化建模的有限元模拟

2.1 参数化模型建立思路

为深入分析兰原黄河大桥桥塔在施工全过程中的受力状态，本文基于 ABAQUS 有限元分析平台构建了桥塔结构的精细化实体模型。模型采用参数化建模与自动建模脚本相结合的方式，另外为实现建模过程的高度自动化与结构参数的灵活控制，本文开发了一个基于 ABAQUS Python API 的参数化建模模块。该模块通过函数式封装的方式，将桥塔有限元建模流程划分为多个可调用、可复用的子程序，涵盖结构构件生成、格划分、荷载施加、材料属性定义及模型导出等关键步骤。使用者仅需输入结构基本参数（如塔柱高度、段数、横截面尺寸、横撑位置及预应力值），程序会根据这些输入数据自动完成：(1)塔柱各段几何轮廓的建模与过渡处理；(2)横截面尺寸沿塔高方向的变化关系；(3)横撑构造的位置、数量与尺寸定义；(4)对称构件与节点的镜像或批量布置；(5)节点荷载位置及约束条件设置；(6)接触与约束关系；(7)施工过程模拟等。最终完成可重复调试、可自动化的参数化建模流程。

```

# 塔柱截面参数
R_hollow = [1727.0, 4329.7, 3997.26, 3895.69, 3408.00, 3408.00]
R_hollow = [5799.0, 4790.0, 5800.00, 5800.00, 5800.00, 5800.00]
X1_loc = [0, -7558.00, -4916.45, 4941.45, 5658.95, 5658.95]
Z1_loc = [0, 28998.00, 4924.37, 62281.21, 2999.90, 51194.53]

# 塔柱分段位置
pier_mid = -12300
ab = pier_01 + pier_mid

# 塔柱截面参数
R_out1[0] = 9080, 8727.05, 8410.38, 8093.73, 7777.08, 7531.46, 7422.21]
M_out1[0] = 9080, 8826.99, 8626.38, 8425.61, 8224.91, 8049.20, 8080]
X_Loc1[0, 0, 0, -2764.72, -4221.81, -5096.98, -4841.57, -7558.02]
Lower_lower_offsetZ[0, 2000, 3000, 3000, 3000, 4500, 2000]

# 塔柱截面参数
R_out2[0] = 7422.21, 4816.7696, 4824.7677, 5135.21, 5080, 5080]
M_out2[0] = 8080, 7958, 4519, 7904, 1819, 7041.55, 7080, 7080]
X_Loc2[0, 0, 0, 11877.91, 11877.91+472, 11877.91+472]
offsetZ[0, 2000, 2924, 3094, 62281.20, 2000, 30, 51194.5247]

# 塔柱截面参数
via_diam = [(0, 3000), (19450, 3000), (19450, 0), (19450, -4128.5525), (14580, -5080), (0, -5080), (-14580, -5080), (-18480, -4128.5525), (-19450, 0), (-19450, 3000), (0, 3000)]
zhong_diam = [(0, 3000), (7500, 3000), (7500, 0), (7972.1120, -3080), (0, -3080), (-7972.1120, -3080), (-7500, 0), (-7500, 3000), (0, 3000)]
shang_diam = [(7, 2000), (7500, 2000), (7500, -2000), (0, -2000), (-7500, -2000), (-7500, 2000), (0, 2000)]
    
```

图 4 整体输入结构参数数据

在几何建模阶段，模块通过参数化定义关键控制点与截面尺寸，采用放样（Loft）方式构建塔柱实体模型，可实现沿高度方向的连续或分段变截面建模，满足桥塔实际结构中截面渐变或突变的设计需求。整体输入结构部分代码如图 4 所示针对横撑、横梁等附属构件，模块根据预设的空间位置参数自动生成构件几何，并与主塔实体进行布尔运算，确保模型拓扑关系

的正确性。在对象识别与操作过程中，模块充分利用 ABAQUS 提供的 findAt 与 getByBoundingBox 等方法，对单元、节点、边和面进行自动定位与筛选，

2.2 材料与单元

有限元模型中混凝土以及桥塔内腔中的空气均采用八节点线性传热六面体实体单元 DC3D8 进行模拟，混凝土本构采用混凝土塑性损伤模型（CDP），弹性模量 34554.3MPa，泊松比 0.2，膨胀角 30°，偏心率 0.1。实体模型本构参数见表 1。钢筋采用理想弹塑性本构模型，弹性模量 205000MPa，屈服强度 1860MPa。为了提取与实桥测点相对应的节点处的应力值，在测点附近加密网格，网格划分大小为 0.1M，以保证节点与传感器布局基本一致。

表 1 应力场计算有限元模型材料主要参数

弹性模量 (Mpa)	膨胀角	偏心率	f _{b0} /f _{c0}	K	粘性系数
34554.3	30	0.1	1.16	0.667	0.0008

2.3 荷载与工况

考虑混凝土材料本身的密度以及配筋率的影响^[11]，混凝土容重取值为 26kN/m³。为简化计算模型并考虑最不利工况，将爬模机荷载简化为作用在塔柱中心的 100t（980kN）的节点荷载。

风荷载标准值按《公路桥梁抗风设计规范》（JTG/T 3360-01-2018）^[12]计算，塔柱风荷载沿高度分布：下塔柱约 9.1 kN/m，中塔柱约 6.6 kN/m，上塔柱约 6.1 kN/m；横梁风荷载：下横梁约 5.2 kN/m，中横梁约 7.0 kN/m，上横梁约 4.2 kN/m。

整体温度荷载采用基于 LSTM 深度学习模型的温度预测结果，结合 2012-2024 年历史气象数据，构建典型日温度变化曲线。梯度温度荷载考虑日照辐射引起的截面温差，平均温差约 6°C，截面为南北侧温差均值。

3 有限元模拟结果分析

3.1 无施工过程应力场模型结果

由于施工过程中的阶段性加载与卸载会对结构受力状态产生显著影响，因此有必要对施工全过程开展应力场模拟分析，以评估结构在各阶段的应力演化情况。下图展示的是在未设置主动横撑条件下，主塔应力场模型结果图 5 所示。

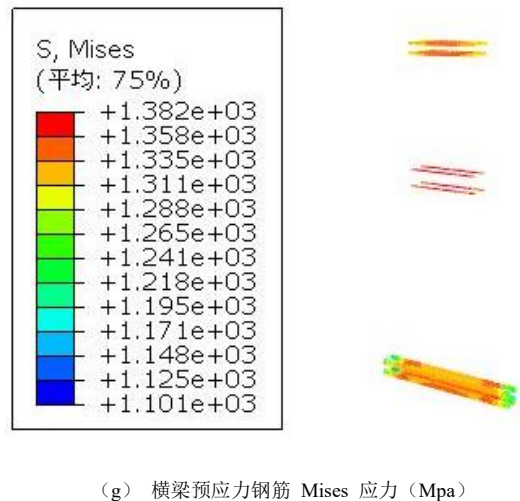
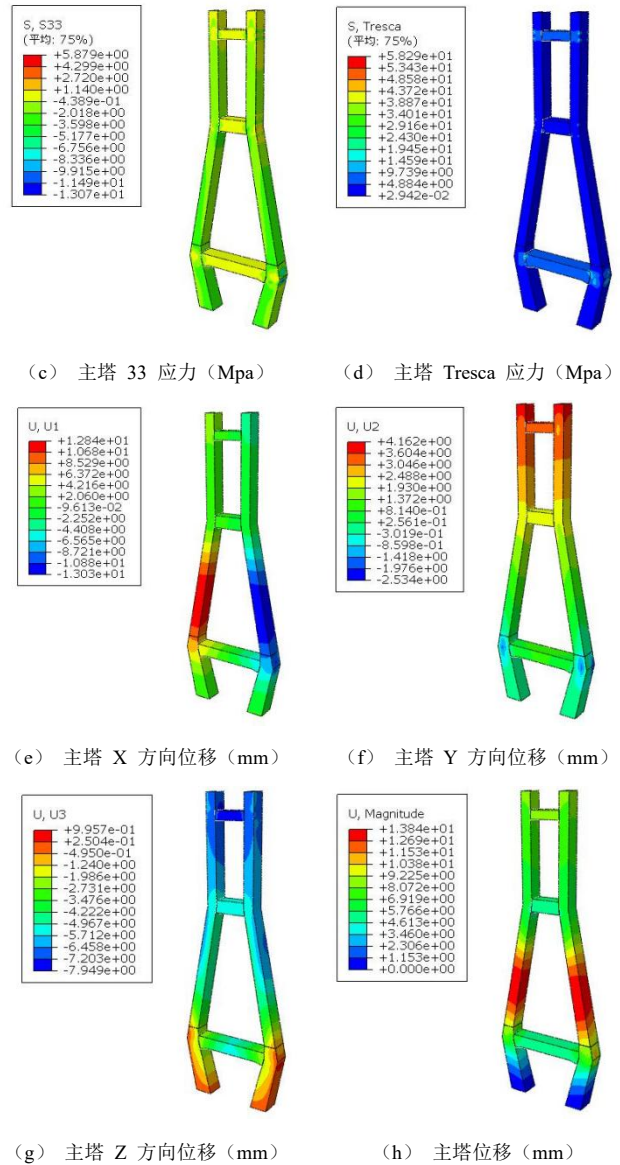
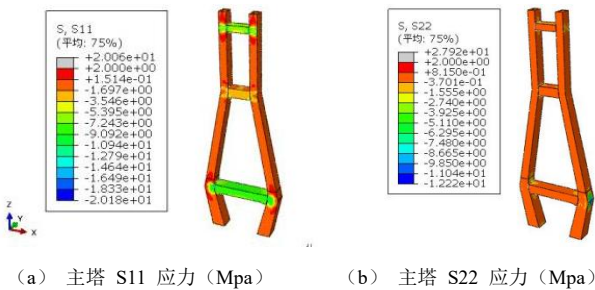


图 5 无施工过程应力场结果

在有限元软件中，设置了八个应力点，测点的顺序以东南角为基准，按照顺时针方向布置。布局与实际测量布置情况

完全一致，确保模型与实际结构的相对位置和分布相符。应力监测截面与测点分布如图 6、7 所示。将有限元模拟结果与实际监测结果进行对比，各截面应力曲线基本吻合，验证了有限元分析结果的可靠性。但仍存在部分截面应力数据记录中断的情况，可能由传感器掉线、采集系统异常、供电不稳或人为操作问题引起，也侧向表明了传感器监测的局限性。

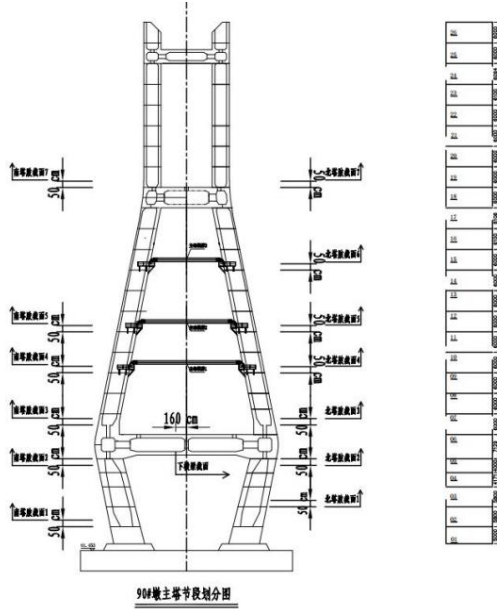


图 6 桥塔应力布置点

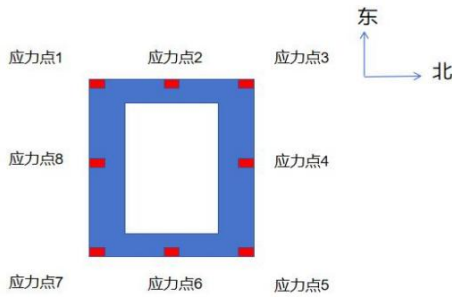


图 7 模型中设置的应力监测点

由上图可知，主塔在无主动横撑辅助施工时，在非预应力锚固区拉应力约为 2Mpa 以上的拉应力；塔柱结构在 X 方向（横桥向）呈现较大水平位移，最大位移值约为 12.8mm，主要集中在中塔柱部位，说明在缺乏横撑限制的情况下，结构存在一定侧向刚度不足问题。在 Y 方向（纵桥向）与 Z 方向（竖向）上，最大位移分别为 4 mm 与 7 mm。

3.2 关键施工步骤应力场结果

如图 8 所示，展示了主塔在各关键施工阶段下的应力分布云图，包括塔柱节段吊装、横梁连接及临时支撑拆除等典型工况。从整体分析来看，主塔在整个自建设过程中的应力水平始终处于安全范围内，未超过设计材料的强度极限，满足规范要求。桥塔最大压应力为 5.619 MPa，与实际测量误差控制在 2.7% 以内，表明参数化有限元模型具有较好的近似性和工程适用性，可有效用于施工阶段结构安全分析与受力评估。综上，

主塔在施工过程中各阶段的应力均未出现超限，结构受力合理、响应平稳，验证了施工方案的可行性与结构设计的安全性。

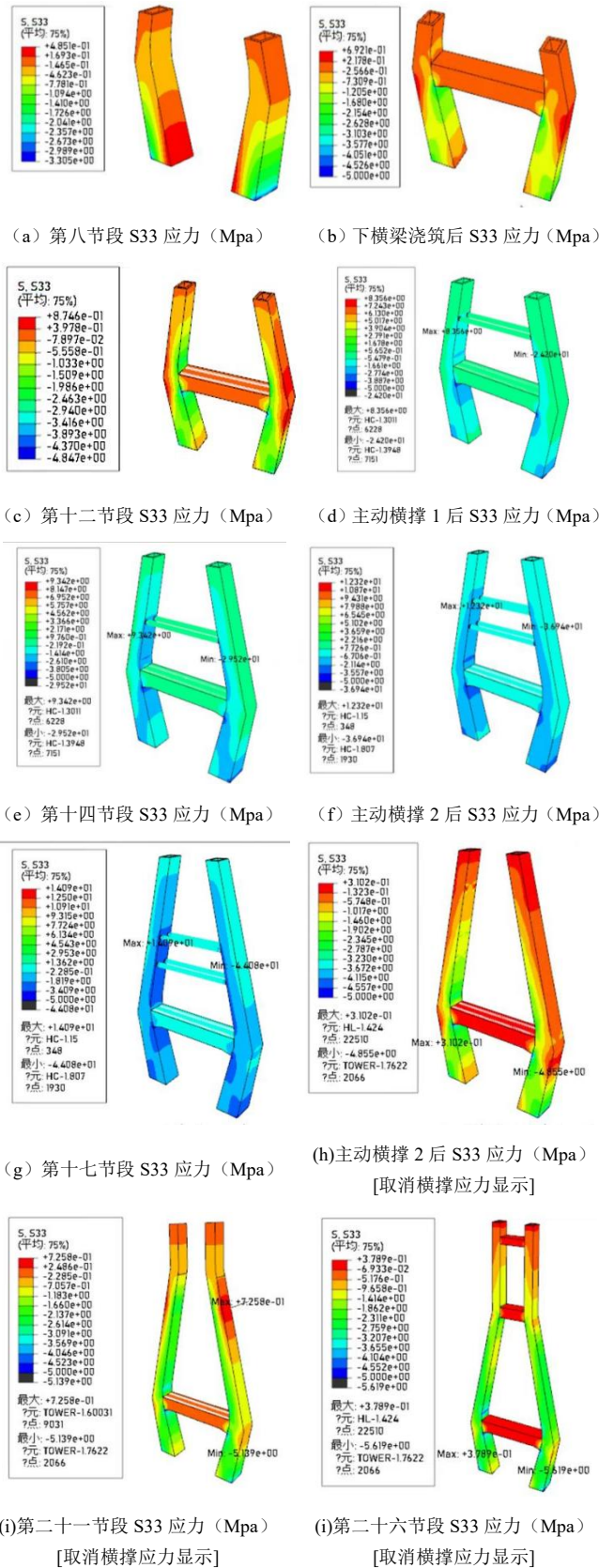


图 8 应力场施工过程部分模拟结果

3.3 自重荷载引起的应力增量

在施工过程中，自重荷载对中塔柱的影响不可忽视。中塔柱作为悬臂倾斜的结构，其自重荷载会随着施工阶段的推进逐渐增加。自重荷载不仅会对塔柱的整体受力状态产生影响，还可能导致塔柱的变形和应力集中，特别是在悬臂浇筑过程中。因此，必须在设计和施工阶段精确计算中塔柱自重荷载所引起的内力分布。截面以压为正，拉为负。图9为节段自重作用下各截面应力变化图。

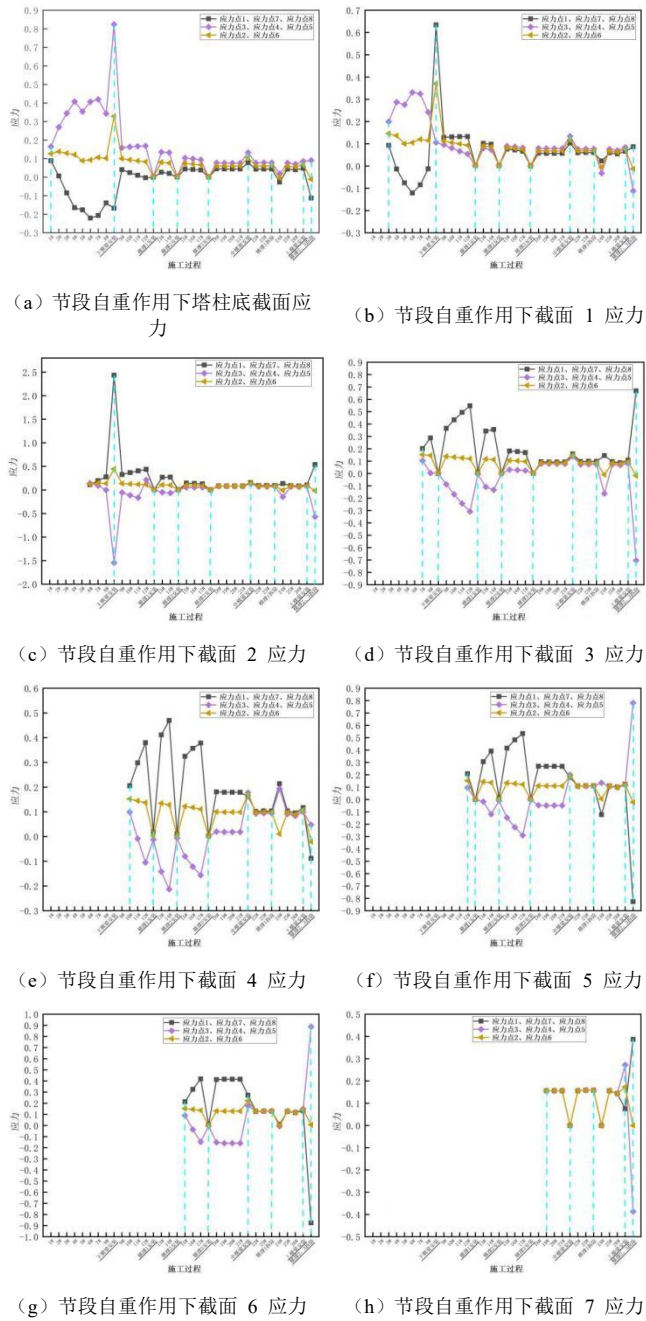


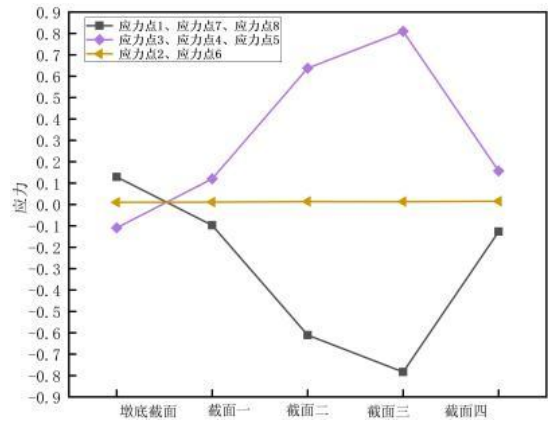
图9 节段自重作用下各截面应力

3.4 横撑顶推力引起的应力增量

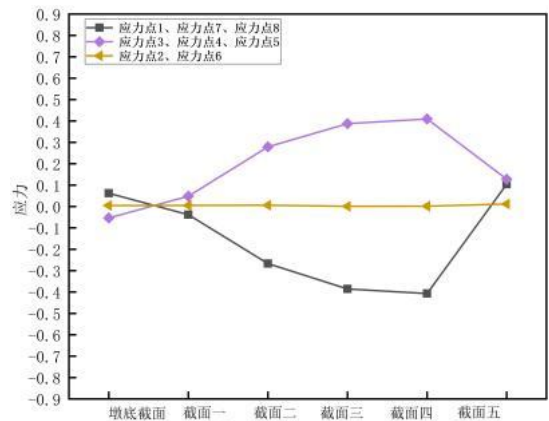
黄河大桥主桥中塔柱为悬臂倾斜的裸塔，且截面尺寸较小，因此在施工过程中需要严格控制塔柱的应力和线形。施工

过程中对中塔柱根部混凝土截面应力的控制成为整个施工方案设计的关键。横撑位置的确定是基于中塔柱在悬臂浇筑过程中所受到的自重和施工荷载作用下不会产生裂缝的最大悬臂高度，同时还需考虑安全储备、爬模工作空间和塔吊的允许悬臂高度等因素。中塔柱共设 3 道横撑，采用双Φ1000*12mm 钢管，最下边横撑施加 2340KN（每根钢管 1170KN）主动预顶力，中间横撑施加 1630KN（每根钢管 815KN）主动预顶力，最上边横撑施加 2110KN（每根钢管 1055KN）主动预顶力。

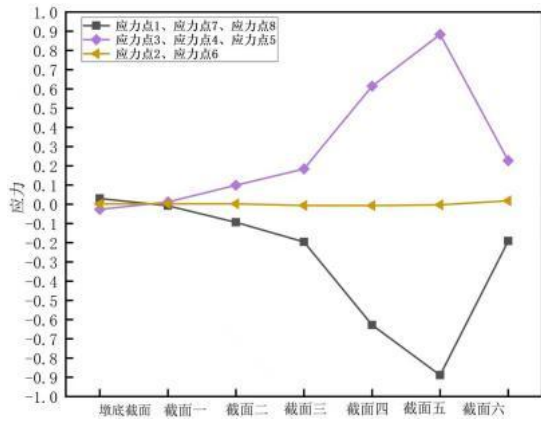
横撑的作用不仅仅是局部支撑，它还对整体结构的变形和力学行为产生深远影响。当后续顶推力施加时，桥梁结构的变形和应力分布可能发生较大变化，这会导致之前已安装的横撑所承担的荷载重新分配，进而影响塔根的受力状态。在没有充分考虑这一点的情况下，仅在横撑位置施加顶推力可能无法准确反映实际情，特别是在涉及结构稳定性和安全性时，可能会高估或低估某些关键区域的受力。因此，为了确保结构分析的准确性和施工过程的安全性，应当考虑横撑对桥结构整体受力的影响。理想的作法是，在考虑横撑位置处的顶推力时，还要综合考虑后续顶推力的施加对前期横撑的影响，进而对整个塔柱及桥梁结构的受力状态进行动态调整和精确分析。如图 10 所示。



(a) 主动横撑 1 引起的各截面应力



(b) 主动横撑 2 引起的各截面应力



(c) 主动横撑 3 引起的各截面应力

图 10 主动横撑引起的各截面应力

4 结论

本文以兰原东坝头黄河特大桥鼎式桥塔为工程背景，基于

参数化建模与自动建模脚本技术，建立了桥塔施工全过程应力场精细化有限元模型，并结合现场监测数据进行了对比验证，得到以下主要结论：

(1) 基于 ABAQUS Python API 开发的参数化建模模块，实现了 33 个施工节段逐步成型及横撑分级顶推过程的自动化模拟，可快速调整几何尺寸、节段划分、横撑位置等关键参数。

(2) 将有限元模拟结果与现场监测数据进行对比，最大压应力误差控制在 2.7% 以内，验证了参数化建模方法的准确性和可靠性。模拟结果表明，在节段自重以及主动横撑顶推作用下，桥塔各施工阶段的应力水平均处于安全范围内，未超过材料强度极限，结构受力合理、响应平稳，验证了施工方案的可行性与结构设计的安全性。

(3) 参数化建模方法在保证监测精度的前提下，有效减少了现场传感器布设数量，降低了高空作业风险和监测成本，为同类桥梁施工过程的安全评估与控制提供参考。

参考文献：

[1] 龙立敦, 符铎. 大跨径混凝土斜拉桥施工运营一体化监测系统研究与设计[J]. 铁道标准设计, 2012(11): 54-62.

[2] 刘路, 龙华. 大跨度斜拉桥的施工监控研究[J]. 四川建材, 2015(05): 81-83.

[3] 贺鹏, 常英, 张延河, 等. 九江长江公路大桥北塔下横梁施工方案研究[J]. 世界桥梁, 2012(04): 52-56.

[4] 林寅. 厦漳跨海大桥南汉斜拉桥索塔中塔柱主动横撑的设计计算[J]. 福建建筑, 2011(09): 59-62.

[5] 向木生, 张世颀, 张开银, 等. 大跨度预应力混凝土桥梁施工控制技术[J]. 中国公路学报, 2002, 15(03): 38-42.

[6] 田仲初, 颜东煌, 席芳柏, 等. 高低塔 PC 斜拉桥(江西鄱阳湖口桥)的监测与监控[J]. 中国公路学报, 2000, 13(04): 55-59.

[7] 韩大建, 苏成. 广东省西部沿海高速公路崖门大桥施工监控及关键技术[J]. 工程力学, 2002(S1): 476-482.

[8] Zhong G, Bi Y, Song J, et al. Digital integration of temperature field of cable-stayed bridge based on finite element model updating and health monitoring[J]. Sustainability, 2023, 15(11): 9028.

[9] Zheng X. Construction monitoring and control of cable-stayed bridges without backstays[J]. Archives of Civil Engineering, 2024, 70(4): 649-666.

[10] Fan J H, Xiao Z H, Cheng X X. Finite element model updating for the Tsing Ma Bridge tower based on surrogate models[J]. Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control, 2021, 41(2): 500-518.

[11] 中华人民共和国交通运输部. 公路桥梁抗风设计规范: JTG/T 3360-01-2018[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2018.

[12] 中华人民共和国交通运输部. 公路桥涵设计通用规范: JTG D60-2015[S]. 北京: 人民交通出版社, 2015.