

# 基于Midas Gen的某悬索桥辅塔液压自爬升平台安全性分析

李 沛, 潘夸世, 吴桂龙

上海理工大学环境与建筑学院, 上海

收稿日期: 2023年12月7日; 录用日期: 2023年12月28日; 发布日期: 2024年1月29日

## 摘 要

液压自爬模施工技术经过多年发展已趋于成熟, 经常应用于高大桥梁墩塔和高层建筑等工程的施工, 但在应用时需结合工程实际情况进行安全性分析, 以消除安全隐患。结合液压自爬模施工技术在某悬索桥辅塔工程中的应用, 介绍自爬升平台组成, 根据自爬升平台在爬模爬升状态、混凝土浇筑状态及停工状态下受到的不同荷载进行组合, 利用有限元软件Midas Gen建立不同工况下的计算模型, 对自爬升平台各部位进行最不利分析, 验证自爬升平台的安全性。

## 关键词

墩塔, 自爬升平台, 有限元分析, 安全性

# Safety Analysis of Hydraulic Self-Climbing Platform for Auxiliary Tower of a Suspension Bridge Based on Midas Gen

Pei Li, Kuashi Pan, Guilong Wu

School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Dec. 7<sup>th</sup>, 2023; accepted: Dec. 28<sup>th</sup>, 2023; published: Jan. 29<sup>th</sup>, 2024

## Abstract

Hydraulic self-climbing mold construction technology has matured after years of development, often used in the construction of tall bridge piers and towers and high-rise buildings and other projects, but the application needs to be combined with the actual situation of the project to analyze the safety, in order to eliminate the potential safety hazards. Combined with the application of

hydraulic self-climbing construction technology in a suspension bridge auxiliary tower project, introducing the self-climbing platform composition, according to the self-climbing platform in the climbing state, concrete pouring state and stopping the state of the different loads subjected to combinations, the use of finite element software Midas Gen to establish a calculation model under different working conditions, the most unfavorable analysis of the parts of the self-climbing platform, to verify the safety of the self-climbing platform. The most unfavorable analysis of each part of the self-climbing platform is carried out to verify the safety of the self-climbing platform.

## Keywords

Pier Tower, Self-Climbing Platform, Finite Element Analysis, Safety

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



## 1. 引言

近年来,中国建设了许多高墩高塔桥梁。其高大的桥梁墩塔施工成为该类桥梁施工的关键环节,如何确保墩塔施工的质量、安全以及加快施工进度已经成为该类墩塔施工的重要课题之一[1][2][3][4]。液压爬模施工技术因其在提高工程施工质量,加快施工进度和节省成本上具有的明显优势[5],在高大桥梁墩塔和高层建筑施工领域的重要性日益突出,但由于液压爬模施工技术在应用于超高建筑物施工时,风险管控难度剧增,因此有必要对爬模系统的相关构件进行应力分析,了解其受力特性和工作状态,确保这些重要构件在施工过程中的安全性[6]。

在以往研究中,国内外学者结合具体项目,对爬模变截面爬升[7][8][9]、爬模拆改作业[10]、爬模结合布料机施工[11][12]、爬模架体抗风拉结[13]、辅助爬升、绿色施工和安全防护等关键问题进行了较全面的分析[14][15][16][17],但具体工程项目中遇到的问题远不止上述研究,人们对其受力机理的认识不是很充足,且施工现场复杂多变,导致对爬模的设计偏于保守。

本文以某悬索桥辅塔液压爬升平台设备为依托,建立有限元模型,分析设备在不同工况下的结构响应,调整相关的构造,验证平台强度与稳定性,以确保液压自爬升平台的施工安全。

## 2. 爬升模板系统组成

液压自爬模系统由模板系统、液压系统、预埋件系统和爬架系统组成[18],本文以某高度为130.0m的悬索桥辅塔施工项目为背景,针对本项目的地理环境及塔柱特点设计的爬升平台架体为桁架式架体,采用整体式结构,单元架体结构自重约1.7t,外模爬架共有5层操作平台,①层平台为顶平台;②层平台为主操作平台;③层平台为爬架爬升控制平台;④层平台涂装平台;⑤层平台为挂座拆卸平台。爬升平台各部构造如图1所示,辅塔外模共有A、B、C、D共4个爬模单元架体,以下分析以A单元架体为例。

## 3. 自爬升平台荷载及工况设计

### 3.1. 平台荷载

#### 3.1.1. 重力荷载

1) 平台上恒荷载包括架体外围防护网、上下架体、平台梁、平台板、钢管、人工作业辅助装置及翻板、扣件等在内的平台钢结构构件自重,约102.7kN,按照1.0kN/m<sup>2</sup>的面荷载换算成线荷载施加在平台梁上。

2) 平台上活荷载的布置为①层平台 3.0 kN/m<sup>2</sup>，②层平台 1.0 kN/m<sup>2</sup>，③层和④层平台其中一层 1.0 kN/m<sup>2</sup>。同样换算成线荷载施加在平台梁上。

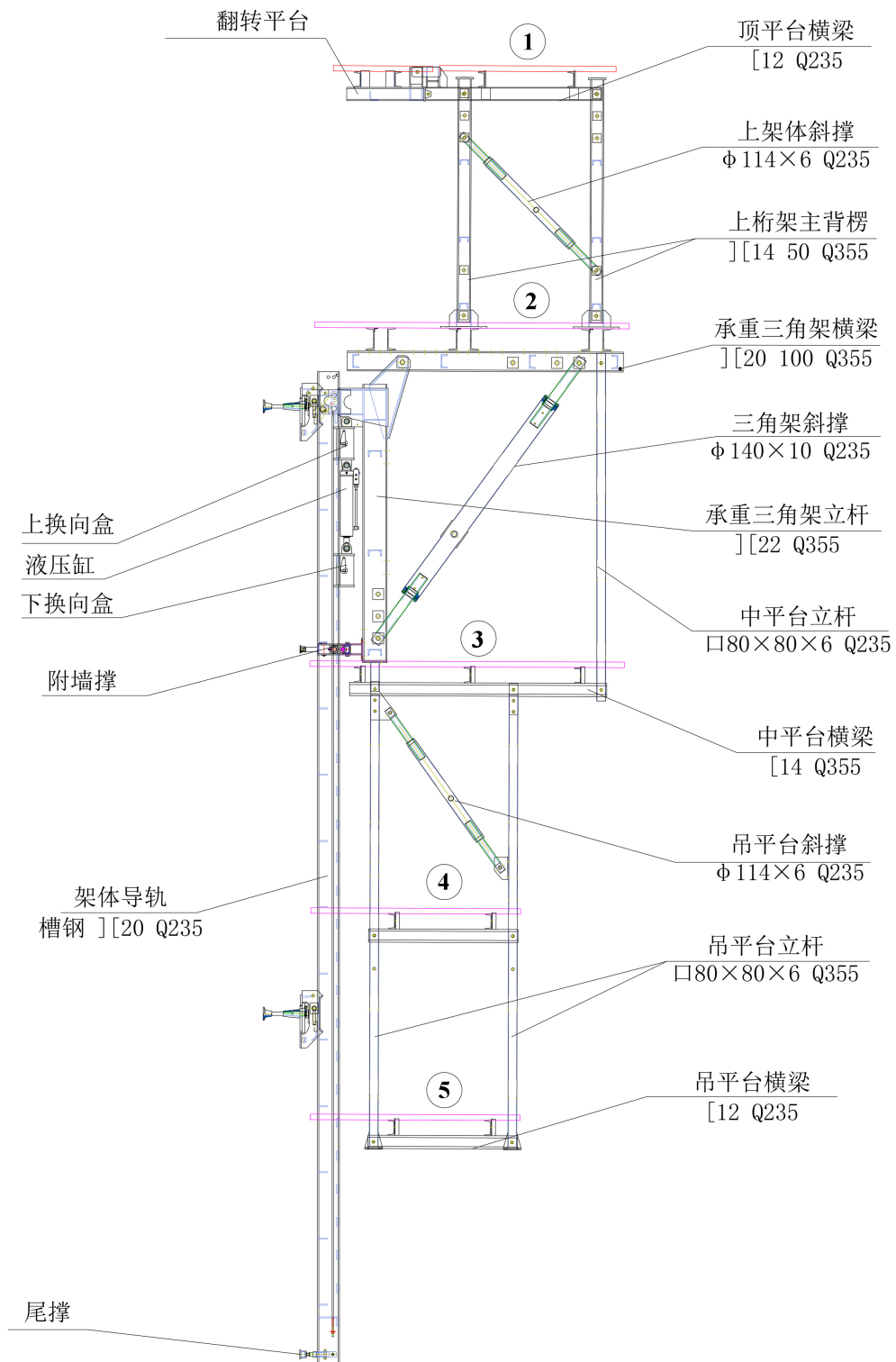


Figure 1. Hydraulic climbing platform structure diagram  
图 1. 液压爬升平台构造图

### 3.1.2. 风荷载

平台结构采用整体设计,当平台处于退模爬升及合模浇筑状态时,按照7级风设计,风速17.1 m/s,根据GB 50009-2012《建筑结构荷载规范》规定[19],计算此时模板迎风面风压为0.47 kN/m<sup>2</sup>,模板背风面风压为0.29 kN/m<sup>2</sup>;当平台处于停工状态时,按照11级风设计,风速32.6 m/s,计算此时模板迎风面风压为1.69 kN/m<sup>2</sup>,模板背风面风压为1.06 kN/m<sup>2</sup>。

## 3.2. 平台工况设计

### 3.2.1. 工况设计

根据自爬升平台处于爬升状态、浇筑状态及停工状态时的受力情况不同,该液压自爬升平台结构安全计算需考虑以下工况。

1) 工况一爬模爬升状态,爬模系统承受7级风荷载、自重和临时施工荷载,检算此时爬模系统受力和变形情况。

2) 工况二混凝土浇筑阶段,爬模系统承受7级风荷载、自重和临时施工荷载,检算此时爬模系统受力和变形情况。

3) 工况三停工状态,采取固定措施后爬模系统承受自重、11级风荷载,检算此时爬模系统受力和变形情况。

### 3.2.2. 荷载组合

本工程设计采用以下荷载组合:① 1.3 D + 1.5 L; ② 1.3 D + 1.5 W; ③ 1.0 D + 1.5 W; ④ 1.3 D + 1.5 L + 0.6 × 1.5 W; ⑤ 1.0 D + 1.5 L + 0.6 × 1.5 W; ⑥ 1.3 D + 0.7 × 1.5 L + 1.5 W; ⑦ 1.0 D + 0.7 × 1.5 L + 1.5 W,其中D为恒荷载标准值,L为活荷载标准值,W为风荷载标准值。

## 4. 架体模型及优化措施

### 4.1. 架体模型

采用有限元软件Midas Gen建立爬模架体的计算模型,以A单元架体为例,优化前架体模型如图2所示,优化后架体模型如图3所示,结构构件等选用一般梁单元模拟。

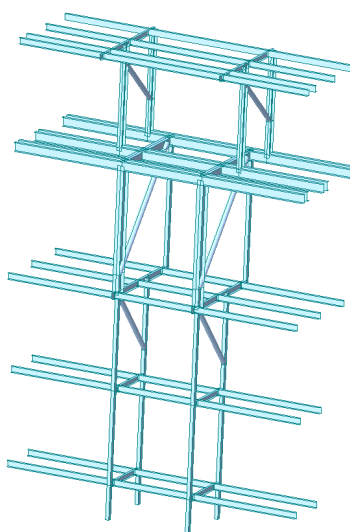


Figure 2. Optimized front frame model  
图2. 优化前架体模型



## 4.2. 优化措施

对于原设计方案中存在的问题，采取以下措施解决：

1) 爬模架体最大应力 303.6 MPa，出现在中平台中间一根纵梁的中部位置，不满足强度设计要求，最大位移变形 37.3 mm，出现在此根纵梁悬挑端部，在进行优化设计时将这根梁的截面由单槽钢 14a 改为双槽钢 14a (间距 50)。

2) 对于上架体 4 根立杆不满足设计要求的问题，将其使用的钢材 Q235 修改为 Q355，同时在立杆之间增加截面为 L100 × 8 的剪刀撑。

3) 为保证架体结构在 11 级大风作用下的安全性，将吊平台立杆全部由 Q235 钢修改为 Q355 钢，大风到来之前在中平台立杆之间加装斜撑。

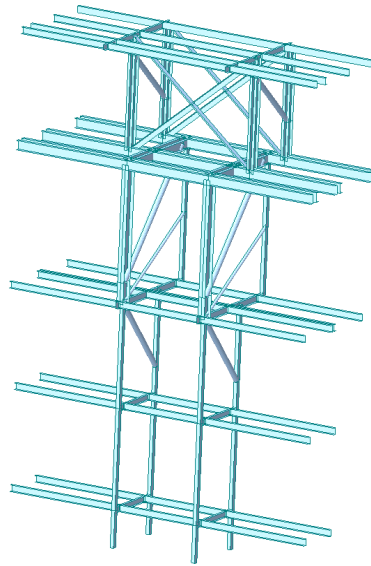


Figure 3. Optimized frame model  
图 3. 优化后架体模型

## 5. 计算结果及分析

### 5.1. 工况 1 下的结构响应

以 A 单元架体为例，爬模爬升状态下，架体承受 7 级风荷载作用，爬模架体最大应力 127.8 MPa，位于中平台外侧纵梁中部，从图中可以看出中平台纵梁中部及吊平台纵梁中部应力较大，其余位置较小，如图 4 所示，最大位移变形为 24.6 mm，出现在中平台悬挑梁端部，如图 5 所示。

### 5.2. 工况 2 下的结构响应

浇筑状态下，架体承受 7 级风荷载作用，爬模架体最大应力 128.5 MPa，同样出现在中平台外侧纵梁中部，如图 6 所示，最大位移变形为 25.0 mm，出现在中平台悬挑梁端部，如图 7 所示。

### 5.3. 工况 3 下的结构响应

停工状态下，架体承受 11 级风荷载作用，爬模架体最大应力 183.9 MPa，位于中平台横梁中部，如图 8 所示，最大位移变形为 22.8 mm (最大位移较前两个工况有所减小是由于 11 级风到达之前临时加装

斜撑的原因), 出现在吊平台悬挑梁端部, 如图 9 所示。

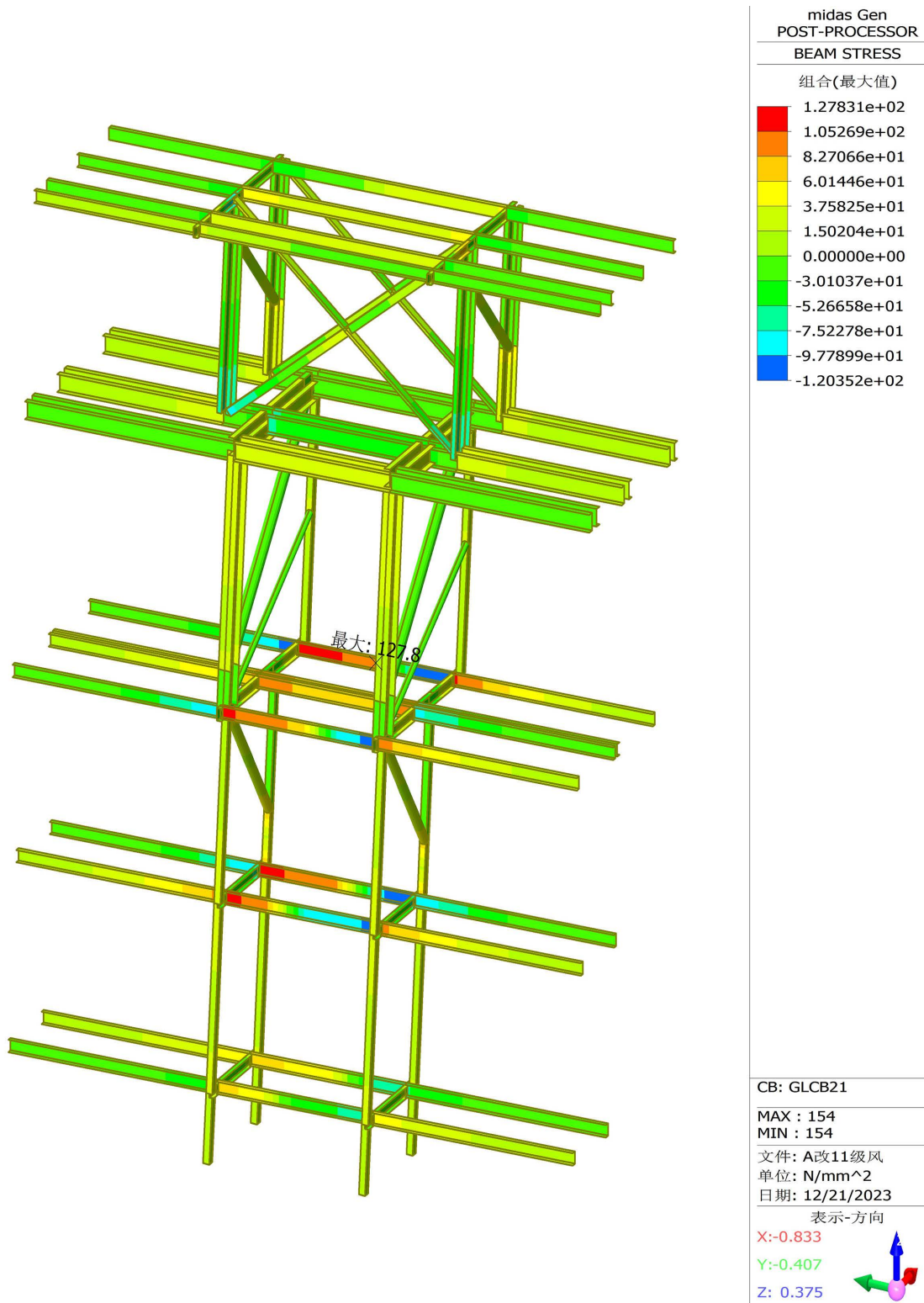


Figure 4. Structural stress diagram under working condition I  
图 4. 工况一下的结构应力图

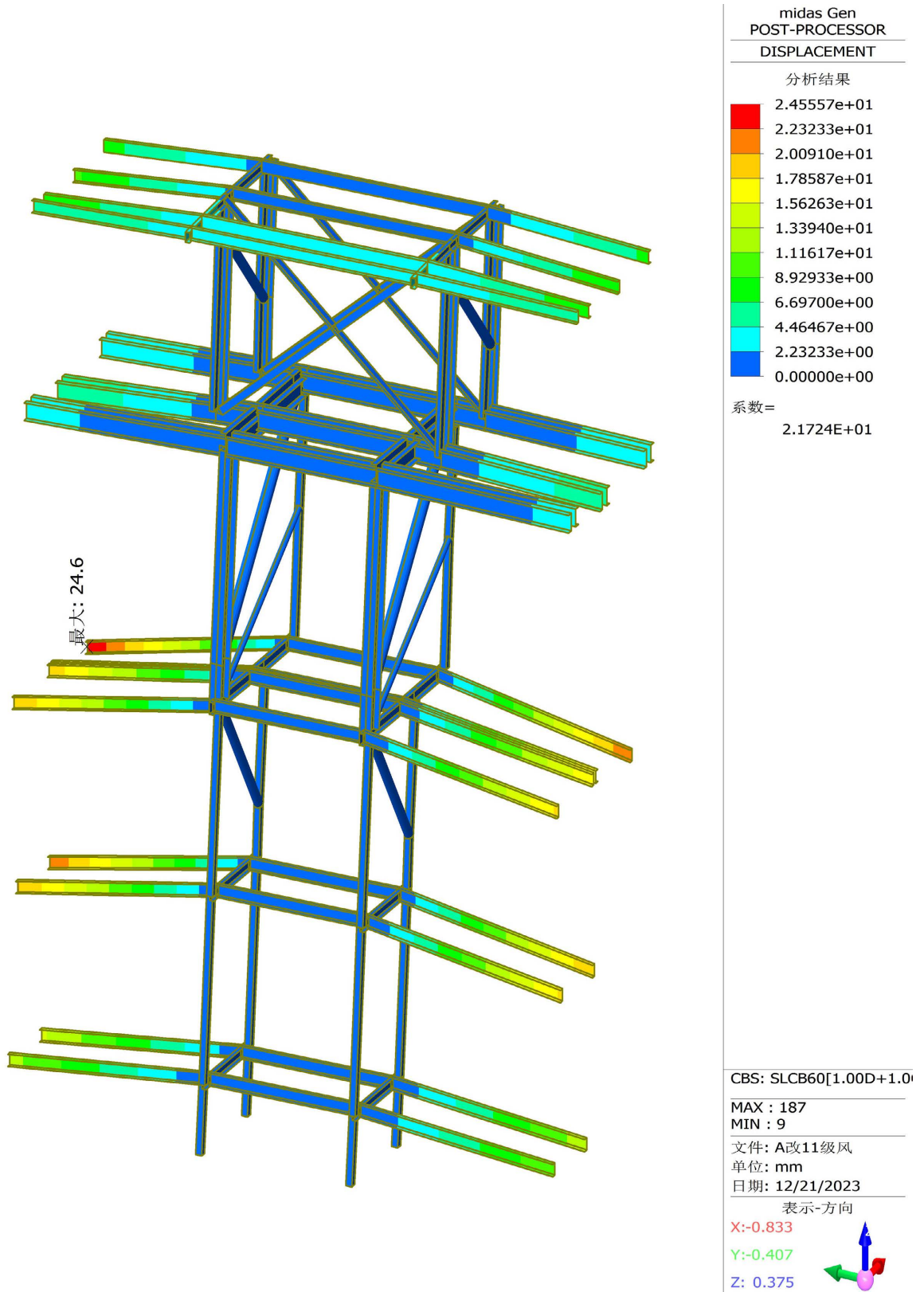


Figure 5. Structural displacement diagram under working condition I  
图 5. 工况一下的结构位移图

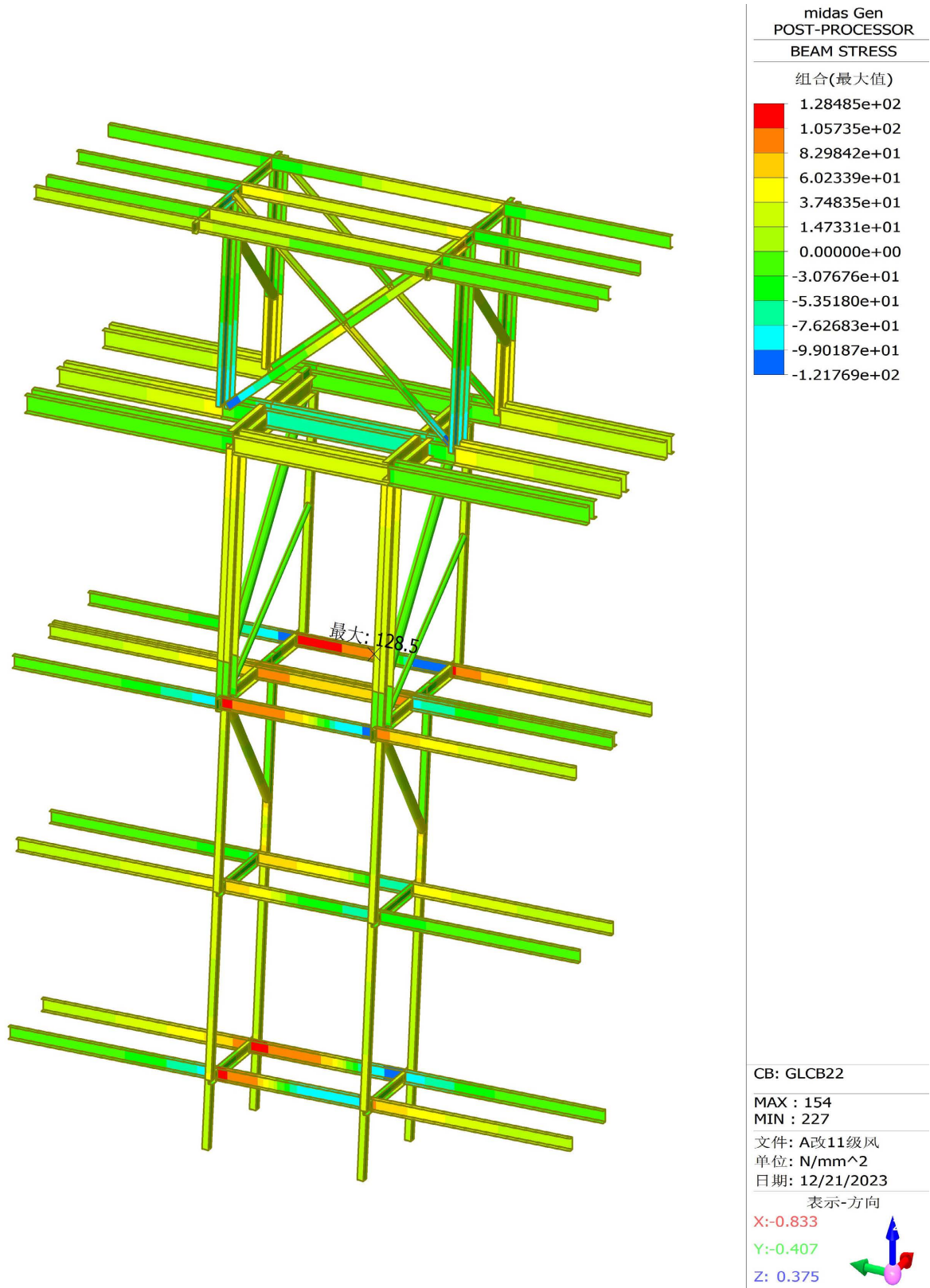


Figure 6. Structural stress diagram under working condition II  
图 6. 工况二下的结构应力图



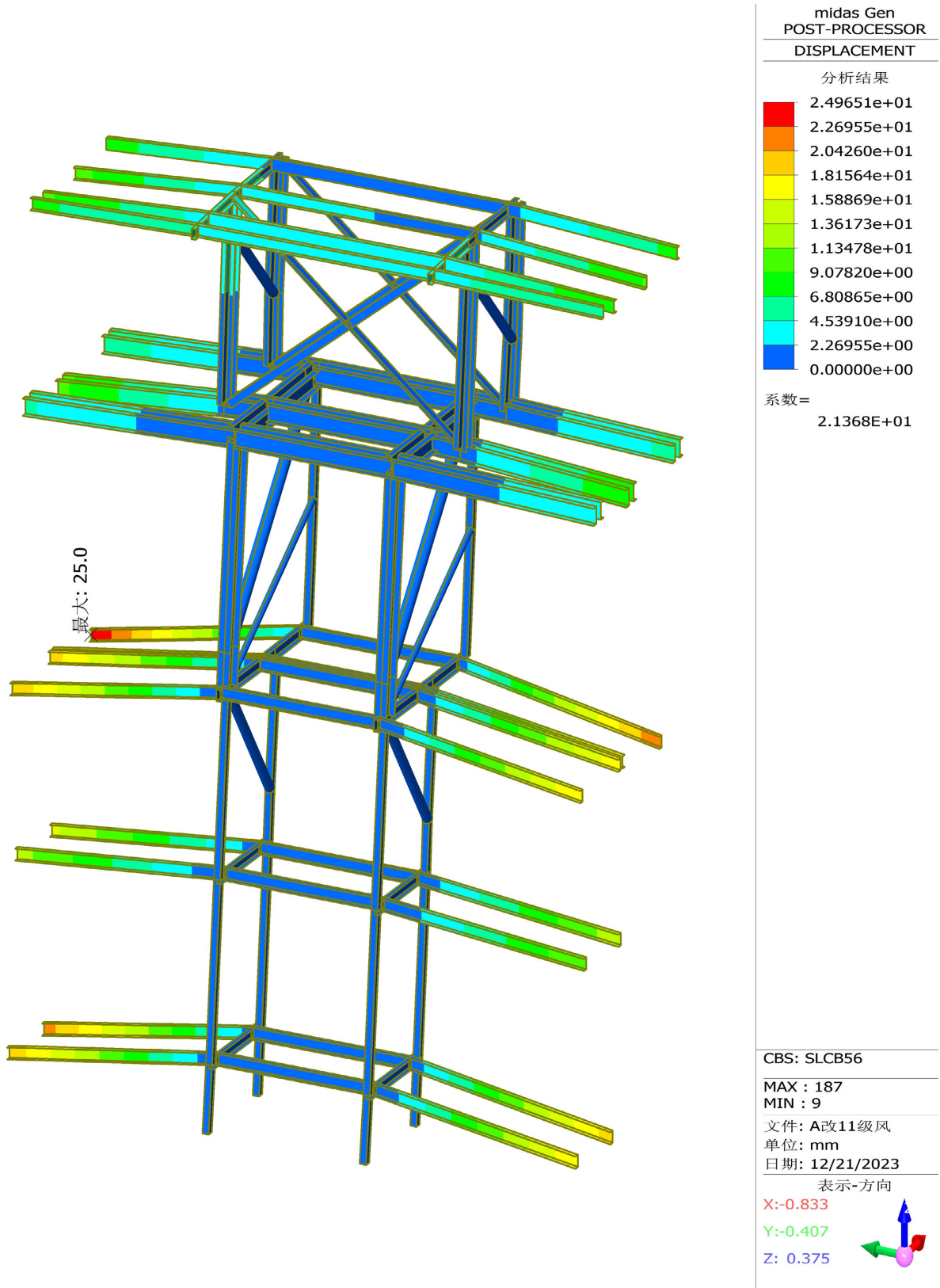


Figure 7. Structural displacement diagram under working condition II  
图 7. 工况二下的结构位移图



Figure 8. Structural stress diagram under working condition III  
图 8. 工况三下的结构应力图

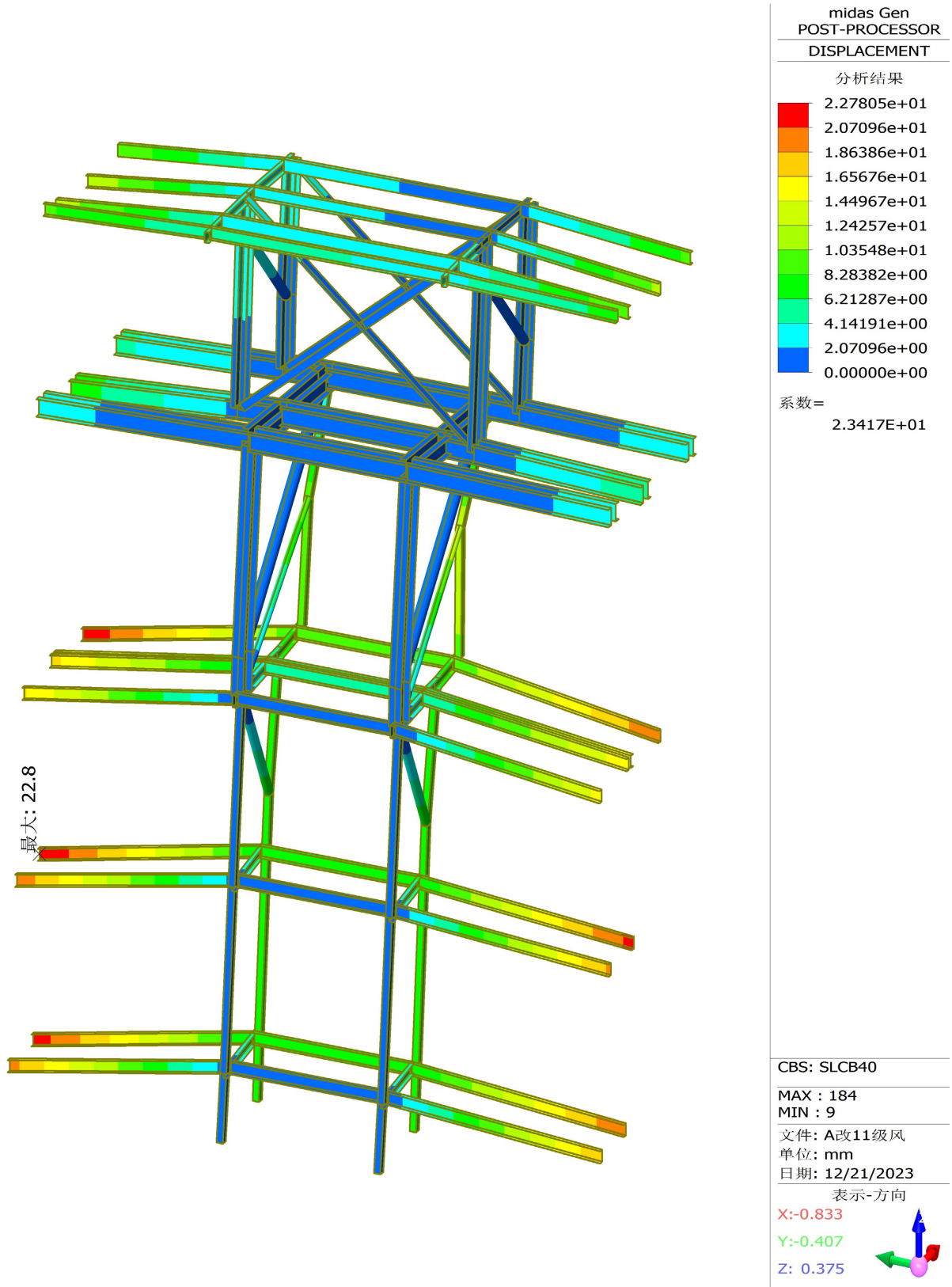


Figure 9. Structural displacement diagram under working condition III  
图 9. 工况三下的结构位移图



综上, 工况三即停工状态下架体受风荷载影响较大, 最大应力为 183.9 MPa, 大约是爬升工况和混凝土浇筑工况下的 1.4 倍, 其所处的中平台横梁为 Q355 级钢材, 强度设计值为 310 MPa, 满足设计要求, 此外, 三种工况下架体所受到的位移变形虽然满足设计要求但均较大, 最大位移变形大多位于各平台悬挑梁端部, 需要在施工过程中要采取一些拉结措施。

#### 5.4. 结果分析

从计算结果中可以看出, 通过采取在立柱之间增加剪刀撑、增大部分构件的截面、提高钢材强度以及在 11 级大风到来之前, 中平台立杆之间增加临时斜撑等优化措施之后, 爬模架体受到的最大应力减小为 183.9 MPa, 位于中平台横梁中部, 满足强度设计要求。最大位移变形减小为 25.0 mm, 出现在中平台悬挑梁端部, 满足设计要求。各架体不同工况下的计算结果如表 1 所示。

**Table 1.** Structural response of each unit of climbing mold frame body under different working conditions

**表 1.** 各单元爬模架体不同工况下的结构响应

单元	工况	最大应力/MPa	最大位移/mm
A	工况一	127.8	24.6
	工况二	128.5	25.0
	工况三	183.9	22.8
B	工况一	108.1	7.7
	工况二	108.3	7.8
	工况三	206.9	8.1
C	工况一	110.5	13.9
	工况二	115.3	14.1
	工况三	225.4	19.7
D	工况一	109.8	10.4
	工况二	118.9	10.5
	工况三	222.1	13.6

通过分析表中数据可以得出, 各单元架体在工况一和工况二下的最大应力以及最大位移相差不大, 但工况三(11 级风)下的最大应力值远高于工况一和工况二, 最大位移也高于工况一和工况二(A 单元架体除外), 由此可见风荷载对爬模架体的影响非常大。各单元爬模架体优化后的设计满足规范要求。

#### 6. 结语

本文通过对某悬索桥辅塔 A、B、C、D4 个爬升平台单元进行有限元模拟分析, 得出如下结论:

- 1) 对于在设计过程中不满足要求的杆件采取增大截面和提高钢材强度的措施, A 单元部分杆件应力虽满足要求, 但应力水平偏高, 将其材质改为 Q355。
- 2) 在上架体立杆之间增加了剪刀撑, 11 级大风到来之前在中平台立杆之间加装斜撑以增加爬升平台结构的安全储备。
- 3) 各平台在风荷载作用下悬挑梁端部的水平位移较大, 其中 A 单元架体在工况二下中平台悬挑梁端部的最大位移变形达到 25.0 mm, 因此进行现场施工应用时, 应对悬挑部分重点关注。
- 4) 在风力达到 7 级以上时, 要停止爬模作业, 同时还要对架体做相应的拉结措施, 把塔柱四周的架体连成一个整体。

## 参考文献

- [1] 黄郑文. 山区高速公路桥梁空心薄壁高墩液压自爬模设计与施工[J]. 世界桥梁, 2019, 47(3): 10-14.
- [2] 尹海明, 王海明. 液压爬模在桥梁等截面空心墩中的施工技术[J]. 公路, 2018, 63(10): 131-134.
- [3] 施洲, 胡豪, 周文, 等. 大跨度混合梁斜拉桥施工控制关键技术[J]. 桥梁建设, 2018, 48(3): 111-115.
- [4] 黑继东, 李霞. 液压爬模在桥梁高墩施工中的应用[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2018, 14(10): 268-269+272.
- [5] Zayed, T. and Mohamed, E. (2014) A Case Productivity Model for Automatic Climbing System. *Engineering, Construction and Architectural Management*, **21**, 33-50. <https://doi.org/10.1108/ECAM-02-2012-0015>
- [6] Huang, R.Y., Chen, J.J. and Sun, K.S. (2004) Planning Gang Formwork Operations for Building Construction Using Simulations. *Automation in Construction*, **13**, 765-779. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2004.05.001>
- [7] 李磊, 曲成平, 宋洪志. 青岛国际航运中心液压爬模专项施工技术研究[J]. 青岛理工大学学报, 2017, 38(1): 27-31.
- [8] 李江华, 魏晨康, 王强, 等. 武汉绿地中心立面曲变巨柱爬模施工技术[J]. 施工技术, 2017, 46(22): 5-8+18.
- [9] 刘福生. 新型附板式液压爬模施工技术[J]. 施工技术(中英文), 2021, 50(16): 15-17+29.
- [10] 于庆波, 田彬, 滕洪园, 等. 液压爬模施工技术在超高层建筑中的应用[J]. 施工技术, 2021, 50(2): 56-59.
- [11] 兰云皖, 肖运清, 李海生, 等. 北京丽泽 E06 项目不规则核心筒爬模架体附着钢支撑柱施工技术[J]. 施工技术, 2021, 50(2): 53-55.
- [12] 张三鹏, 张文光, 钟国兴. 超高层核心筒液压爬模及布料机一体化施工技术[J]. 施工技术, 2020, 49(2): 77-79.
- [13] 金和卯, 周裕桂, 刘福生, 等. 超高层建筑爬模施工及管理技术[J]. 施工技术(中英文), 2022, 51(23): 126-130.
- [14] 毛伟琦, 黄辉. 棱形多肢桥塔施工关键技术[J]. 世界桥梁, 2018, 46(5): 27-31.
- [15] 侯亚威, 全占丰. 空心薄壁高墩提升爬模施工控制研究[J]. 公路, 2016, 61(9): 164-167.
- [16] Liu, X., Hu, Y. and Chen, D. (2012) Safety Control of Hydraulic Self-Climbing Formwork in South Tower Construction of Taizhou Bridge. *Procedia Engineering*, **45**, 248-252. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.08.152>
- [17] Li, X., Gui, L. and Liu, W. (2022) Research on Intelligent Safety Control Systems of Hydraulic Climbing Formwork for Main Pylons of Long-Span Bridges. *2nd International Conference on Internet of Things and Smart City (IoTSC 2022)*, Xiamen, 8 May 2022, 97. <https://doi.org/10.1117/12.2636949>
- [18] 田海龙. 液压爬模在空心薄壁墩的应用和经济分析[J]. 广东土木与建筑, 2021, 28(6): 98-101.
- [19] 中国建筑科学研究院. GB 50009-2012 建筑结构荷载规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.