

DOI: 10.7672/sgjs2025020043

机场航站楼大跨度钢屋盖结构抗倒塌性能评估*

张文津^{1,2}, 李向冰¹, 贾宝莹¹, 张红志¹, 王祥祥¹, 万涛平³, 马洁烽³

(1. 中建八局浙江建设有限公司, 浙江 杭州 311200; 2. 同济大学土木工程学院, 上海 200092; 3. 浙江精工钢结构集团有限公司, 浙江 绍兴 312000)

[摘要] 西安咸阳国际机场东航站楼由集中式主楼和 6 条指廊构成。主楼屋盖采用正交正放钢网架结构, 由 56 根 Y 形钢柱和 56 根幕墙钢柱支承, 采用楼面散件拼装、分区提升就位、嵌补构件合龙施工方案。为评估大跨度屋盖钢结构在承重构件失效情况下的抗倒塌性能, 选取 28 种典型单柱去柱工况, 进行等效静力、弹塑性动力时程、竖向静力弹塑性分析。研究表明, 大跨度钢屋盖结构在单柱去柱工况下仍保持弹性, 竖向变形和构件应力均在有限范围内, 抗倒塌性能良好。动力放大系数取 2.0, 能偏安全地估计单柱失效时结构动力响应。在内侧 Y 形中柱去柱工况下, 结构抗倒塌系数较低; 在外侧幕墙柱去柱工况下, 结构抗倒塌系数较高。

[关键词] 航站楼; 钢结构; 有限元分析; 变形; 应力; 抗倒塌性能

[中图分类号] TU391

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2025)02-0043-07

Anti-collapse Performance Evaluation of Large-span Steel Roof Structure for Airport Terminal

ZHANG Wenjin^{1,2}, LI Xiangbing¹, JIA Baoying¹, ZHANG Hongzhi¹,
WANG Xiangxiang¹, WAN Taoping³, MA Jiefeng³

(1. Zhejiang Construction Co., Ltd. of China Construction Eighth Engineering Division, Hangzhou, Zhejiang 311200, China; 2. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. Zhejiang JINGGONG Steel Building Group Co., Ltd., Shaoxing, Zhejiang 312000, China)

Abstract: The east terminal of Xi'an Xianyang International Airport is composed of a centralized main building and six corridors. The roof of the main building adopts the orthogonal steel grid structure, which is supported by 56 Y-shaped steel columns and 56 curtain wall steel columns. The construction scheme of floor assembly, partition lifting and positioning, and embedded component closure is adopted. In order to evaluate the progressive collapse resistance of large-span roof steel structures under the failure of load-bearing components, 28 typical single column removal conditions were selected for analysis of equivalent static, elastic-plastic dynamic time history and vertical static elastic-plastic. The research shows that the large-span steel roof structure remains elastic under single column removal condition, the vertical deformation and component stress level are in limited range, and the anti-collapse performance is good. The dynamic amplification factor is 2.0, which can safely estimate the dynamic response of the structure when a single column fails. Under the condition of removing the inner Y-shaped middle column, the anti-collapse coefficient of the structure is low. Under the condition of removing the column of the outer curtain wall, the anti-collapse coefficient of the structure is high.

Keywords: terminals; steel structures; finite element analysis; deformation; stress; anti-collapse performance

0 引言

机场航站楼工程一般体量庞大、专业工程复杂, 为实现自由曲面的建筑造型, 屋盖多采用大跨度钢结构。在爆炸、火灾或地震等偶然事件作用下, 主要承重构件可能失效, 结构抗倒塌性能直接

* 上海市 2024 年度“科技创新行动计划”启明星项目(24QB2707500)
[作者简介] 张文津, 工程师, E-mail: 1150744@tongji.edu.cn
[收稿日期] 2024-09-01

关乎人民生命财产安全。

现阶段,关于机场航站楼屋盖钢结构抗倒塌性能的研究较为丰富。文献[1-5]对北京大兴国际机场航站楼钢屋盖结构设计、抗震性能、抗倒塌性能等进行了全面研究。张超等^[6]以新建昆明机场航站楼大型钢屋盖为研究对象,提出了火灾下大跨度网架结构抗倒塌设计方法。牟在根等^[7]研究了大跨度钢结构在地震作用下的行波效应,评估结构受多点激励时的力学性能与抗倒塌安全冗余程度。赵广坡等^[8]对成都双流国际机场大跨度钢结构抗倒塌性能进行精细分析,评估结构抗倒塌安全性。周国军等^[9]从张弦结构张拉控制施工技术出发,提出了能提高结构安全冗余度的施工方法。

既有研究成果涵盖了机场航站楼大跨度屋盖钢结构抗倒塌力学性能设计、计算及施工方法。但大跨度屋盖钢结构空间造型灵活多变,结构传力路径、非线性屈服机制及损伤演变过程不尽相同,大型工程必须对其抗倒塌性能进行特定分析,方可准确评价结构安全性。

西安咸阳国际机场东航站楼^[10-11]屋盖为大跨度钢网架结构。为评估屋盖结构在主要承重构件失效情况下的抗倒塌性能,根据结构传力路径选取 28 种典型单柱失效工况,展开等效静力、弹塑性动力时程、竖向静力弹塑性分析,可为类似工程提供参考。

1 工程概况

西安咸阳国际机场东航站楼工程含集中式主楼(中央 C 区)和 6 条指廊(N1,N2,N3,S1,S2,S3)及南北 2 个连接区结构 NL,SL,总建筑面积为 70 万 m²,地上建筑面积 59.6 万 m²、地下建筑面积 10.4 万 m²。建筑高度 47.5m,主楼地上 4 层、局部地下 3 层。航站楼纵、横向长度分别为 1 242,832m,属超长结构。6 条指廊结构长度为 206~422m,宽度为 41.5~60.2m。整体结构如图 1 所示。

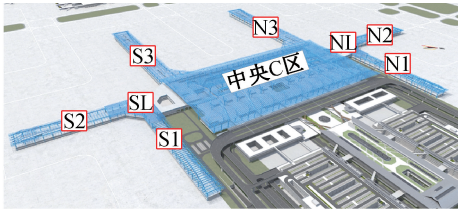


图 1 西安咸阳国际机场东航站楼工程效果
Fig.1 East terminal project effect of Xi'an Xianyang International Airport

主楼屋盖采用正交正放焊接空心球钢网架结构,如图 2 所示。结构采用双向曲面造型,按高度分

为低区、中区、高区及纵向轴线位置的采光天窗。屋盖钢网架长度为 522m、宽度为 286m,结构最高点标高为 46.000m,最大安装标高为 47.500m。

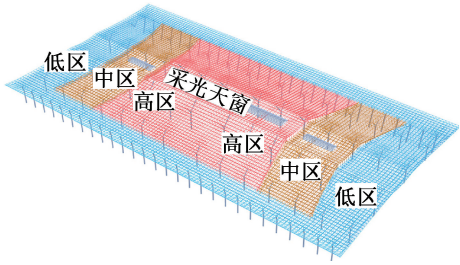


图 2 主楼屋盖钢网架结构
Fig.2 Steel grid structure of main building roof

屋盖钢网架由 Y 形柱(56 根)、陆侧幕墙柱(28 根)及空侧幕墙柱(28 根)支承,如图 3 所示。其中, Y 形柱呈 14×4 形式布置,沿整体结构纵向间距为 36m。

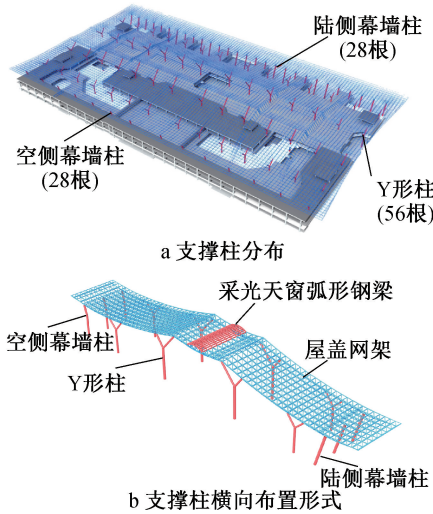


图 3 钢屋盖下部支撑结构
Fig.3 Supporting structures of steel roof

2 数值模拟分析

2.1 模型建立

有限元软件 ANSYS 在参数化建模分析和结构体系非线性力学计算等方面优势显著^[12],为评价大跨度屋盖钢网架抗倒塌性能,采用 ANSYS 软件建立数值模拟模型,如图 4 所示。

钢屋盖结构数值模拟模型同时考虑几何非线性与材料非线性。钢材弹性模量为 2.06×10^5 MPa,泊松比取 0.3,密度为 $7\,850\text{kg/m}^3$,Q355 钢材屈服强度为 355MPa,Q420 屈服强度为 420MPa。假定钢材具备理想弹塑性本构模型(屈服后刚度比为 0),服从随动强化滞回规则。天窗结构、下部 Y 形柱及陆、空侧幕墙柱均采用 beam188 单元模拟,划分为 3 段;屋盖钢网架杆件采用 link8 单元模拟,划分为



图 4 钢屋盖结构数值模拟模型

Fig. 4 Numerical simulation model of steel roof structure

1 段。

结构恒荷载、活荷载、风荷载由设计软件 (MIDAS) 导入 ANSYS。通过对桁架杆件乘以自重系数,考虑螺栓球节点自重 (自重系数取 1.25)。马道恒荷载取 2.0kN/m,活荷载 (施工荷载与检修荷载) 取 1.0kN/m²,等效为节点力施加于马道起始两端网架节点。

2.2 计算分析工况

为评价屋盖钢网架抗倒塌性能,采用去柱法分析下部支撑柱 (Y 形柱,陆、空侧幕墙柱) 失效后整体结构力学性能。由于屋盖结构呈双向对称,可取 1/4 结构的 28 根下部支撑柱作为去柱对象 (见图 5),包括 14 根幕墙柱、7 根边侧 Y 形柱及 7 根中央 Y 形柱,分别记为 M1~M14,B1~B7,Z1~Z7,共 28 种单柱去柱工况。

对 28 种单柱去柱工况分别进行等效静力分析,以动力放大系数 (取值为 2.0) 考虑结构瞬时去柱的动力响应。取 4 种不利工况进行弹塑性动力时程分析,验证动力放大系数合理性。基于结构给定荷载,通过竖向静力弹塑性分析 (Pushdown 分析),确定结构破坏时的抗倒塌竖向极限承载力。

3 结构抗倒塌性能分析

3.1 完整结构受力性能

完整结构前三阶振型如图 6 所示,前三阶振型周期分别为 0.619,0.475,0.433s。静力荷载作用下结构变形及应力如图 7 所示。

由计算结果可知:①大跨度屋盖钢网架面外刚

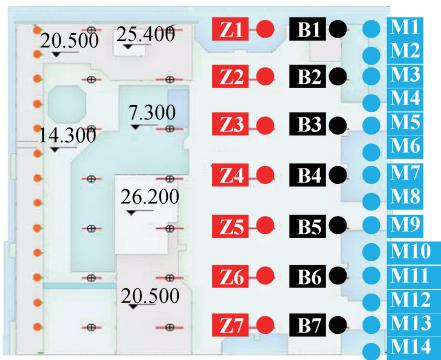


图 5 去柱位置示意

Fig. 5 The column removal location

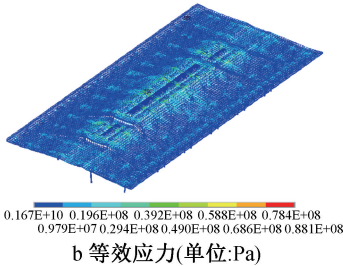
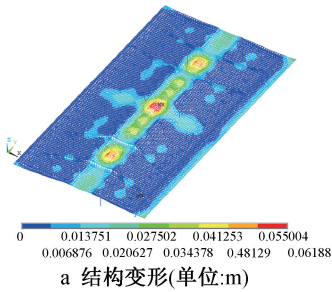


图 7 静力荷载作用下结构变形及应力
Fig. 7 Deformation and stress of structure under static loads

度相对较弱;②在静力荷载作用下,结构最大挠跨比为 1/529,小于 JGJ 7—2010《空间网格结构技术规程》规定的 1/400 限值^[13],符合设计要求;③在静力荷载作用下,结构最大等效应力为 88.1MPa,最大应力比为 0.248,满足构件强度和稳定性要求。

3.2 等效静力分析

根据文献[14],将静力荷载乘以 2.0 的动力放

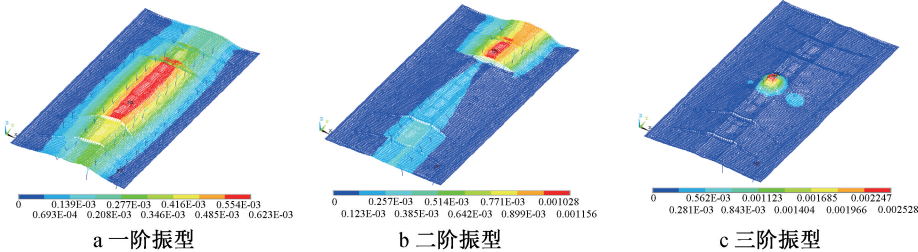


图 6 结构前三阶振型
Fig. 6 The first to the third modes

大系数后作用于结构,用于考虑结构瞬时去柱时的动力效应。通过 ANSYS 生死单元法^[12],“杀死”指定单元,模拟结构竖向承重柱瞬时失效。针对 28 种单柱去柱工况,考虑材料非线性效应和几何非线性效应,分别进行去柱后的等效静力分析。结构去柱位置挠度及最大应力如表 1 所示。

表 1 结构等效静力分析结果

Table 1 Results of equivalent static analysis		
去柱构件编号	去柱位置挠度/mm	最大应力/MPa
M1	68.2	113.7
M2	9.2	113.7
M3	10.3	113.7
M4	11.4	113.7
M5	10.3	113.7
M6	9.8	113.7
M7	10.1	113.7
M8	10.1	113.7
M9	10.2	113.7
M10	10.1	113.7
M11	10.4	113.7
M12	10.3	113.7
M13	9.9	113.8
M14	11.8	113.7
B1	73.7	113.7
B2	53.8	113.7
B3	44.4	113.7
B4	45.7	113.7
B5	47.1	113.7
B6	44.2	113.7
B7	57.4	114.5
Z1	233.1	113.7
Z2	109.0	113.7
Z3	118.0	113.7
Z4	122.0	113.8
Z5	144.8	113.6
Z6	149.8	116.7
Z7	195.0	119.3

由计算结果可知:①中柱(Z1~Z7)失效对结构影响较大,结构变形普遍高于边柱和幕墙柱去柱工况;②Z1 上部屋盖悬挑,在所有 Y 形柱失效工况中,

Z1 变形最显著(233.1mm);③幕墙柱去柱工况中结构变形较小,M1 上部屋盖外侧悬挑,变形最大,为 68.2mm。

为进一步描述各单柱去柱工况下结构安全性,定义构件名义正应力 σ_z ,如式(1)所示。

$$\sigma_z = \frac{P}{A}$$

(1)

式中: P 为构件轴力; A 为构件截面积。

分别统计 28 种单柱去柱工况下名义正应力超过 2,3,4,5,6,7,8MPa 的构件数量,分布如图 8 所示。分析可知:

1) 结构在 28 种去柱工况下处于弹性,超过 99.9%构件名义正应力 ≤ 8 MPa。各单柱去柱工况下屋盖钢网架结构安全,抗倒塌性能良好。

2) 各幕墙柱和边柱去柱工况下构件名义正应力分布差异较小,构件应力水平较低。

3) 不同中柱去柱工况对构件数量分布影响显著,构件总体应力水平较幕墙柱和边柱去柱工况更高,Z4,Z6,Z7(结构内侧 Y 形中柱)名义正应力相对最高。

选取 4 种不利工况(单柱去柱 M1,Z4,Z6,Z7)进行分析,结构变形和构件轴力如图 9 所示。

3.3 弹塑性动力时程分析验证

为准确反映主要承重构件失效过程中的结构动力响应,分别对 4 种不利工况(单柱去柱 M1,Z4,Z6,Z7)展开弹塑性动力时程分析。采用生死单元法模拟竖向支撑柱瞬时失效^[12]。构件失效后结构自由振动,服从瑞利阻尼,等效阻尼比设定为 2%。4 种工况去柱位置竖向挠度时程曲线如图 10 所示,同时标注了等效静力法计算所得的去柱位置竖向挠度。分析可知:

1) 采用等效静力法计算所得的结构挠度略大于弹塑性时程分析结果,4 种工况偏差为 7.5%~16.2%。等效静力法相对准确,动力放大系数取

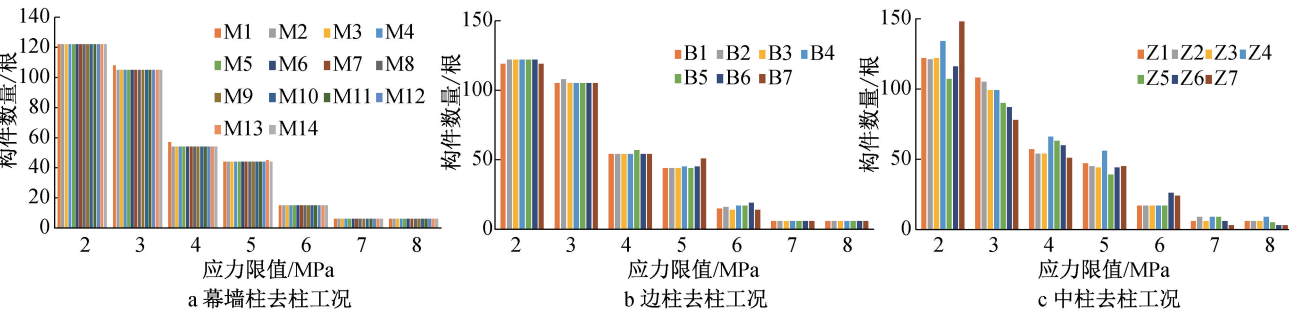


图 8 单柱去柱工况下构件数量随名义正应力限值的分布

Fig. 8 Distribution of the number of components with the nominal normal stress limited values under single column removal conditions

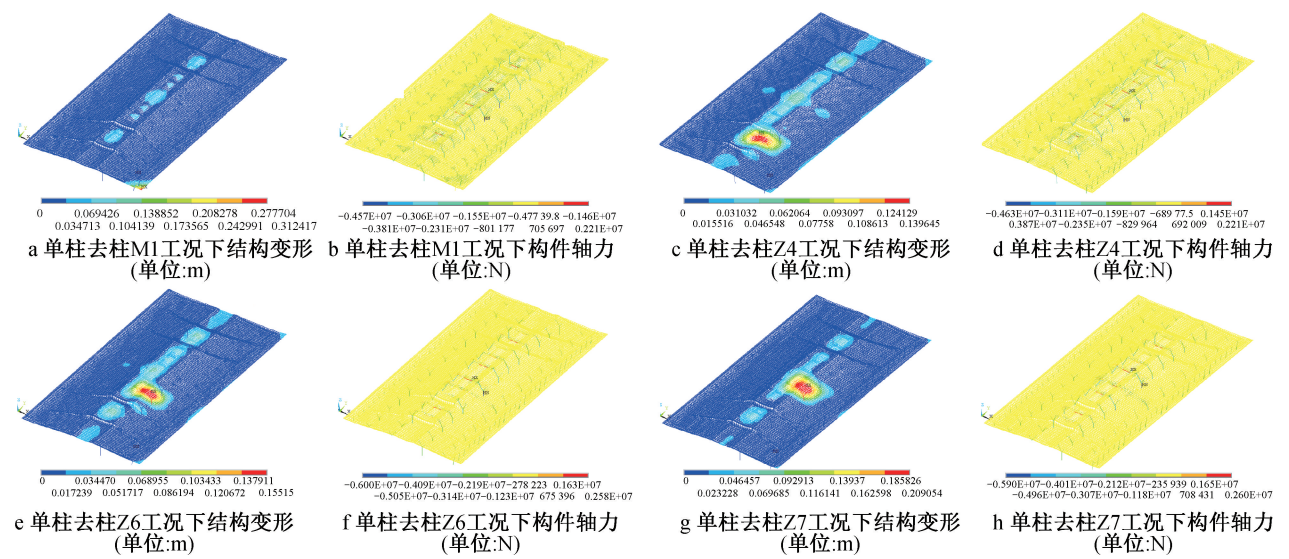


图 9 4 种单柱去柱工况下结构变形及构件轴力

Fig. 9 Structural deformation and component axial force under four kinds of single column removal conditions

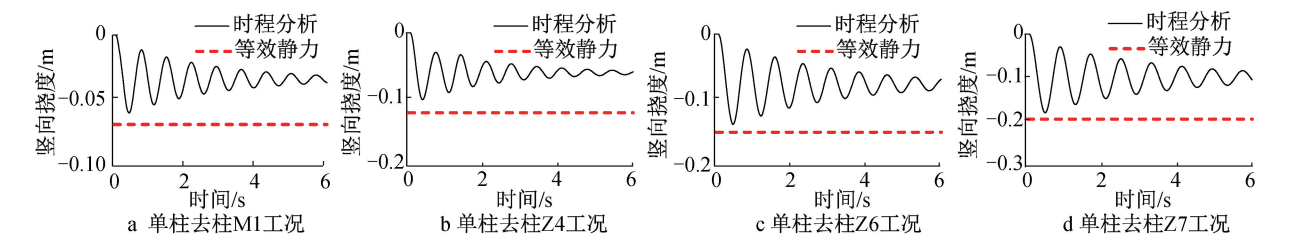


图 10 去柱位置竖向挠度时程曲线

Fig. 10 Time history curves of vertical deflection at column removal position

2.0 可偏安全地估计结构去柱工况下的动力响应。

2) 以等效静力法替代弹塑性动力时程分析,保证准确性的同时,可降低结构抗倒塌分析的计算成本。

3) 4 种单柱去柱工况下,结构发生有限变形,去柱位置挠度时程曲线波峰稳定衰减,结构抗倒塌能力良好。

3.4 竖向静力弹塑性分析

为评估支撑柱失效时结构极限承载力,对 4 种不利工况分别进行竖向静力弹塑性分析。采用生死单元法模拟支撑柱失效,对去柱位置施加竖向位移荷载,记录去柱位置竖向位移与集中反力,得到 4 种工况下 Pushdown 曲线,如图 11 所示。

定义抗倒塌系数 μ 描述结构安全冗余度。 μ 表示位移加载过程中最大集中反力与未失效时支撑柱初始轴力的比值。4 种工况下去柱位置最大集中反力与失效前支撑柱初始轴力如表 2 所示。

4 种不利工况下,结构达到最大加载反力时的位移和失效位置构件等效应力如图 12 所示。

由计算结果可知:

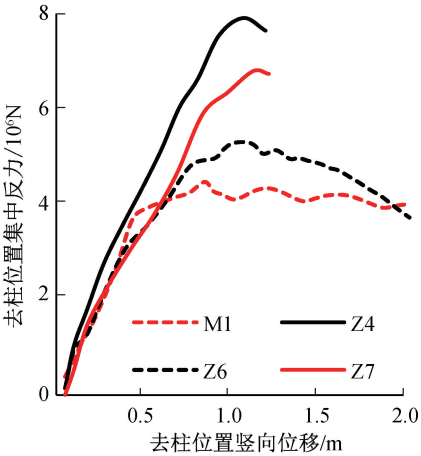


图 11 4 种单柱去柱工况下 Pushdown 曲线

Fig. 11 Pushdown curves under four kinds of single column removal conditions

1) 当加载集中反力达最大值时,钢网架在加载位置的部分上弦杆全截面屈服。4 种不利工况下结构抗倒塌系数均 > 1.0 ,单柱失效后不发生整体倒塌。

2) 4 种不利去柱工况中,单柱去柱 Z4 工况下结构绝对承载力最高。单柱去柱 M1 工况下结构绝对

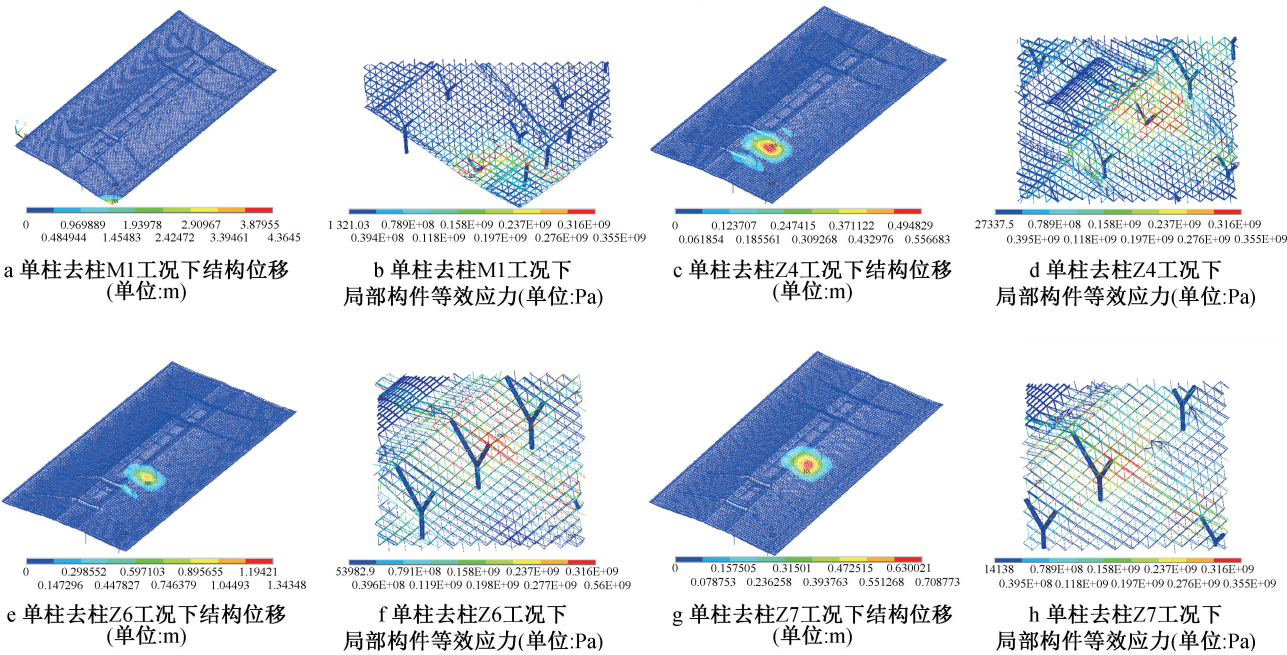


图 12 结构位移及局部构件等效应力云图

Fig. 12 Structural displacement and equivalent stress of partial components

表 2 最大集中反力及柱轴力

Table 2 The maximum concentrated reaction force and column axial force			
工况	最大集中反力/kN	未失效时初始轴力/kN	抗倒塌系数 μ
单柱去柱 M1	4 470.3	929.5	4.8
单柱去柱 Z4	7 912.5	2 594.6	3.0
单柱去柱 Z6	5 307.5	3 172.4	1.7
单柱去柱 Z7	6 797.8	4 527.5	1.5

承载力最低,但抗倒塌系数最高,结构安全冗余度最大。单柱去柱 Z6,Z7 工况下结构抗倒塌系数较低,安全冗余度相对较低。

3) 承重柱失效位置的屋盖结构刚度越大,结构抗倒塌系数越低、安全冗余度越低。M1 外侧悬挑,竖向刚度相对较小,抗倒塌系数最高,安全冗余度最高;Z4 位于屋盖钢网架高区和中区临界位置(局部天窗),屋盖刚度局部不连续,单柱去柱 Z4 工况抗倒塌系数高于单柱去柱 Z6,Z7 工况,安全冗余度较单柱去柱 Z6,Z7 工况更高。

4 结语

1) 西安咸阳国际机场东航站楼大跨度屋盖钢结构在不同单柱失效情况下仍保持弹性,竖向变形和构件应力在有限范围内,抗倒塌性能良好。

2) 在内侧 Y 形中柱失效情况下,结构变形相对较大、抗倒塌系数较低、安全冗余度较低。在外侧幕墙柱失效情况下,结构变形相对较小、抗倒塌系数较高,安全冗余度较高。

3) 动力放大系数取 2.0,能偏安全地估计单柱失效时结构动力响应。以等效静力法替代弹塑性动力时程分析,在保证精度的同时可降低结构抗倒塌分析的计算成本。

参考文献:

[1] 束伟农,朱忠义,祁跃,等. 北京新机场航站楼结构设计研究[J]. 建筑结构, 2016, 46(17): 1-7.
SHU W N, ZHU Z Y, QI Y, et al. Design and research on terminal building of Beijing New Airport [J]. Building structure, 2016, 46(17): 1-7.

[2] 张爱林,方浩,刘学春,等. 北京大兴国际机场航站楼大跨度钢结构 C5 区地震响应分析[J]. 建筑钢结构进展, 2021, 23(1): 25-30.
ZHANG A L, FANG H, LIU X C, et al. Seismic responses analysis of large-span steel structure in C5 district of Beijing Daxing International Airport [J]. Progress in steel building structures, 2021, 23(1): 25-30.

[3] 张爱林,王小青,刘学春,等. 北京大兴国际机场航站楼大跨度钢结构整体缩尺模型振动台试验研究 [J]. 建筑结构学报, 2021, 42(3): 1-13.
ZHANG A L, WANG X Q, LIU X C, et al. Shaking table test on overall-scale model of long-span steel structure of Beijing Daxing International Airport terminal [J]. Journal of building structures, 2021, 42(3): 1-13.

[4] 朱忠义,王哲,束伟农,等. 北京新机场航站楼屋顶钢结构抗连续倒塌分析[J]. 建筑结构,2017,47(18): 10-14.
ZHU Z Y, WANG Z, SHU W N, et al. Progressive collapse analysis on roof steel structure of terminal building of Beijing new airport [J]. Building structure, 2017, 47(18): 10-14.

[5] 蔡建国,王峰岚,冯健,等. 大跨空间结构连续倒塌分析若干

问题探讨[J]. 工程力学,2012,29(3):143-149.

CAI J G, WANG F L, FENG J, et al. Discussion on the progressive collapse analysis of long-span space structures[J]. Engineering mechanics,2012,29(3): 143-149.

[6] 张超,殷颖智,罗明纯. 新建昆明国际机场航站楼屋顶网架结构的抗火研究与设计[J]. 建筑钢结构进展, 2009, 11(5): 56-62.

ZHANG C, YIN Y Z, LUO M C. Study and design on fire resistance of grid structures of the roof for New Kunming Airport [J]. Progress in steel building structures,2009, 11(5): 56-62.

[7] 牟在根,杨雨青,柴丽娜,等. 超长大跨结构多点激励的若干问题研究 [J]. 土木工程学报, 2019, 52(11): 1-12.

MU Z G, YANG Y Q, CHAI L N, et al. Some issues on multi-support seismic excitation of ultra-long span structure [J]. China civil engineering journal, 2019, 52(11): 1-12.

[8] 赵广坡,肖克艰,冯远,等. 成都双流国际机场T2航站楼大厅陆侧大跨钢结构抗连续倒塌分析[J]. 建筑结构,2010, 40(9): 27-30.

ZHAO G P, XIAO K J, FENG Y, et al. Progressive collapse analysis on the large span steel structure of Chengdu Shuangliu International Airport T2 terminal[J]. Building structure, 2010, 40(9): 27-30.

[9] 周国军,刘中华,俞福利,等. 温州机场张弦结构非张拉建立预应力施工技术[J]. 建筑钢结构进展, 2022, 24(3): 105-112.

ZHOU G J, LIU Z H, YU F L, et al. Non-tensioned prestressing construction technology of string structure in Wenzhou Airport [J]. Progress in steel building structures,2022, 24(3): 105-112.

[10] 扈鹏,曹莉,李贞,等. 西安咸阳国际机场东航站楼钢结构设计[J]. 建筑结构, 2022, 52(11): 8-14,63.

HU P, CAO L, LI Z, et al. Steel structural design of east terminal building of Xi'an Xianyang International Airport [J]. Building structure, 2022, 52(11): 8-14,63.

[11] 马洁烽,邢遵胜,吴楚桥,等. 西安咸阳国际机场T5航站楼钢屋盖旋转提升施工技术[J]. 施工技术(中英文), 2024, 53(2): 7-14.

MA J F, XING Z S, WU C Q, et al. Rotary lifting construction technology of steel roof of Xi'an Xianyang International Airport T5 terminal [J]. Construction technology, 2024,53(2): 7-14.

[12] 王新敏. ANSYS 工程结构数值分析[M]. 北京:人民交通出版社,2007.

WANG X M. Numerical analysis of ANSYS engineering structure [M]. Beijing:China Communications Press, 2007.

[13] 中国建筑科学研究院. 空间网格结构技术规程: JGJ 7—2010 [S]. 北京:中国建筑工业出版社,2010.

China Academy of Building Research. Technical specification for space frame structures; JGJ 7—2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press,2010.

[14] 朱慈勉. 结构力学[M]. 北京:高等教育出版社,2016.

ZHU C M. Structural mechanism [J]. Beijing: Higher Education Press,2016.