

不规则大跨悬挑结构优化设计与力学特性数值模拟分析

Analysis of Optimal Design and Mechanical Properties by Numerical Simulation Method on
Longspan Irregular Cantilevered Structure

张宁^{1,2}, 钮鹏³, 蒋航海^{2,4}

(1. 安徽省城建设计研究总院, 安徽 合肥 230051; 2. 安徽建筑大学, 安徽 合肥 230601;
3. 沈阳大学 建筑工程学院, 辽宁 沈阳 110044; 4. 安徽省招标集团, 安徽 合肥 230051)

摘要: 辽宁省档案馆新馆为省级重点建设工程, 建筑平面布置较为复杂。根据该工程平面不规则及大悬挑的特点, 运用 Midas/Gen 等有限元分析软件进行数值模拟分析。在分析过程中, 用静力等效风荷载来代替规范给出的基本风压, 从静力风荷载和地震荷载两种角度来进行结构的抗震性能分析。根据计算结果, 获得在不同工况和方案条件下悬挑结构同楼板、桁架杆件和关键节点之间受力、变形的联系。针对部分节点变形过大的问题, 采取增设斜撑等方式, 减小构件内力, 控制竖向变形, 为类似不规则大悬挑结构的抗震设计提供优化方案和完善措施。

关键词: 不规则建筑; 悬挑结构; 数值模拟分析; 抗震性能

中图分类号: TU375.4 文献标志码: A 文章编号: 1005-8249 (2023) 03-0002-06

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2023.03.002

ZHANG Ning^{1,2}, NIU Peng³, JIANG Hanghai^{2,4}

(1. Anhui Urban Construction Design Insistute Corp, Hefei 230051, China;

2. Anhui Jianzhu University, Hefei 230601, China;

3. Institute of Architectural Engineering, Shenyang University, Shenyang 110044, China;

4. Anhui Tendering Group, Hefei 230051, China)

Abstract: The new Liaoning Provincial Archives is a provincial key construction project, and the building layout is relatively complex. According to the characteristics of irregular plane and large cantilever of the project, the finite element analysis software such as Midas/Gen is used for numerical simulation analysis. In the analysis process, the static equivalent wind load is used to replace the basic wind pressure given by the code, and the seismic performance of the structure is analyzed from the two aspects of static wind load and seismic load. According to the calculation results, the stress and deformation relations between the cantilever structure and the floor, truss members and key nodes under different working conditions and schemes are obtained. To solve the problem of excessive deformation of some joints, diagonal bracing is added to reduce the internal force of members and control the vertical deformation, so as to provide optimization schemes and improvement measures for the seismic design of similar irregular large cantilever structures.

Keywords: irregular building; cantilevered structure; numerical simulation method analysis; seismic performance

作者简介: 张宁 (1994—), 男, 硕士, 助理工程师。研究方向: 结构工程。

收稿日期: 2022-06-21

0 引言

辽宁省档案馆新馆位于沈阳市浑南区, 是中

建筑结构

国单体面积最大的档案馆，该档案馆包含一层地下车库，地上部分根据不同的功能划分为 6 大块区域，并采用沉降缝将各区域分隔开。其中，占地面积最大的 D 区域主要建筑功能为展厅和服务大厅，外围设置了一定数量的悬挑篷。

本文通过在有限元分析软件中建立结构模型，并输入相关荷载来模拟结构不规则和大悬挑对结构整体抗震性能带来的影响。在满足规范要求的基础上对双边大悬挑结构以及大开洞区域周边的楼板进行受剪和应力验算，得出了二者与整体结构之间的受力规律，并总结出了楼板刚度降低对悬挑桁架造成的影响。最后，对作为抗震关键部位的悬挑结构，进行大震条件下的弹塑性抗震分析^[1]，针对个别节点部位受力过大的问题，通过抗震关键部位优化设计，提高辽宁省档案馆抗震性能。

1 结构体系和结构布置

D 区域的主体结构采用框架结构，悬挑部分采用钢结构。结构标准层平面尺寸为 $85.5\text{ m} \times 74\text{ m}$ ，最大高度 40 m 。主体范围楼盖主要采用钢筋混凝土梁板，在 18 轴至 21 轴之间，由于建筑功能需求，有大面积的开洞，特别是 4 层楼面至屋面，建筑物整体尺寸内收，楼面面积急剧减小，而开洞面积不变，导致开洞面积超过楼面面积的 30%，形成平面不规则，且开洞位置与悬挑结构仅间隔一跨，洞口与悬挑结构之间的区域受力十分复杂^[2]。

D 区域东侧屋面向外悬挑 18 m ，该悬挑部分采用钢结构空腹桁架；西侧屋面向外悬挑 15 m ，采用平面内钢结构桁架。结构的计算三维模型和悬挑结构的平面布置如图 1 至图 3 所示。

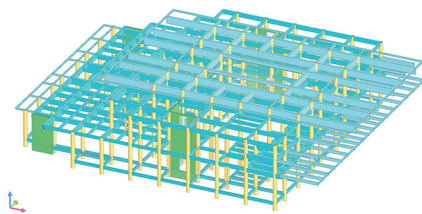


图 1 结构计算三维模型
Fig. 1 Structural calculation 3D model

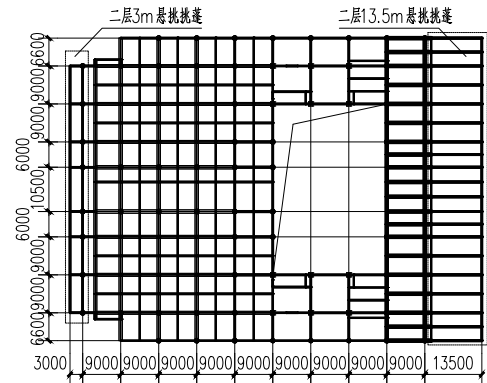


图 2 带悬挑楼层的平面结构布置图（二层）
Fig. 2 Layout plan of floor structure with overhang (second floor)

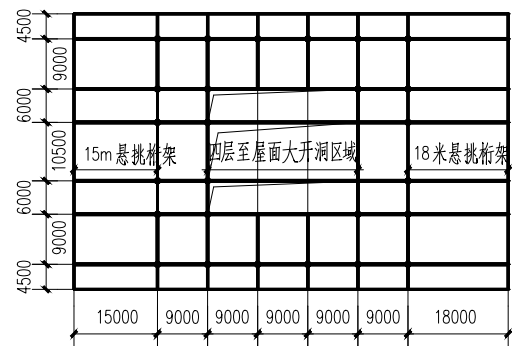


图 3 带悬挑楼层的平面结构布置图（屋面）
Fig. 3 Layout plan of floor structure with overhang (roof)

空腹桁架体系的立面如图 4 所示，悬挑长度为 18 m ，桁架高度为 9 m ，约为悬挑跨度的 $1/2L$ ，在该比例下，悬挑桁架具有非常理想的刚度和稳定性。

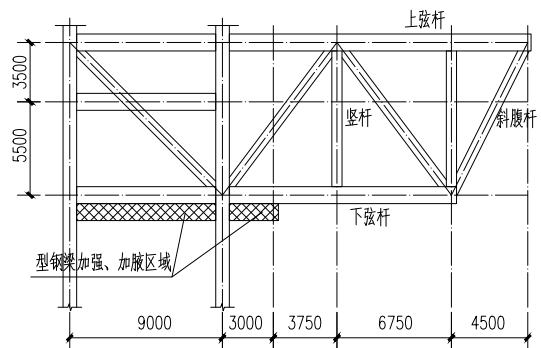


图 4 空腹桁架立面图
Fig. 4 Elevation view of open web truss

图 4 所示的空腹桁架为焊接 H 型钢，楼面为钢梁+压型钢板组合楼盖的形式，板厚和屋面板按 200 mm 设计。这里为保证平面外部稳定^[3]，在上弦杆和下弦杆之间设置了水平交叉支撑，同时三层楼面处，对悬挑钢梁进行加强和加腋处理，加腋长度为 3 m ，在不影响立面效果的前提下提升梁

建筑结构

承载力。主桁架构件材质选用 Q345GJ 钢, 其余部位选用 Q345B 钢。空腹桁架主要构件截面尺寸如表 1 所示。

表 1 桁架主要构件截面尺寸

Table 1 Cross section dimensions of the main components of the truss

| 杆件类别 | 尺寸 (mm) |
|------|-----------------|
| 上弦杆 | H1000×700×70×70 |
| 中弦杆 | H900×500×50×50 |
| 下弦杆 | H1300×700×70×90 |
| 斜腹杆 | H1000×700×50×60 |
| 竖杆 | H700×700×35×45 |

平面内钢结构桁架体系^[4]的主要受力构件采用焊接型 H 型钢, 屋面为钢梁+压型钢板组合楼盖, 厚度按 250 mm 设计, 在楼盖上下表面钢板之间预留足够的空间。经过多次试算与优化, 与主楼连接的钢梁尺寸取 H2500×550×28×46 (H 按 1/6 倍 L 设计); 边跨二级悬挑梁取 H2000×350×20×40 (H 按挠度控制); 外侧封口钢梁尺寸取 H1400×350×10×22, 材料及尺寸均通过承载力和变形控制。经计算, 单靠钢梁无法满足悬挑结构的稳定性, 由于预留了足够的空间, 可以在屋面平面内设置简易桁架体系^[4], 来确保悬挑主桁架的平面外部稳定, 提升悬挑结构的刚度。桁架采用双层檩条来加强支撑, 材料尺寸选用方钢管 180×180×8×8, 材质为 Q345C, 在钢梁上下翼缘各设一层; 另外, 在屋面钢梁中部布置刚性系杆 (XG), 跨度控制在 4m 以内, 材料尺寸选用圆钢管, 直径 244×6, 材质为 Q345C, 用于抵抗纵向力; 同时, 在悬挑桁架的边跨及中跨的楼层平面内, 将水平交叉支撑 (SC) 布置在梁中部, 材料尺寸选用圆钢管, 直径 219×6, 材质为 Q345C, 以提升平面外稳定性。

D 区域采用现阶段广泛使用的基于性能的设计方法进行设计, 由于使用功能的特殊性, 需要控制结构构件在火灾、高温影响下的变形, 性能目标设为 C 类。

2 主要设计参数

考虑到结构刚度由风荷载控制时, 结构竖向构件刚度富余很少, 在进行计算时, 按照风荷载参与地震组合考虑, 地震荷载和风荷载默认作用

方向为水平方向, 恒载和活载为竖直方向, 在梁端、柱端同时产生弯矩, 各种荷载产生的弯矩图进行比较, 按同向取正, 反向取负, 并按各荷载组合进行包络, 得出最终的计算结果。

2.1 地震作用

档案馆新馆 D 区域抗震设防烈度为 7 度 (0.1 g), 场地类别为 II 类, 场地特征周期为 0.35 s, 地面粗糙度类别为 B。

2.2 静力等效风荷载

大跨度悬挑结构具有自重轻、跨度大、刚度小等特点, 对风荷载较为敏感。为提高档案馆新馆 D 区域结构的安全性。利用 Midas/Gen 有限元分析软件对风荷载响应最严重的 18 m 和 15 m 悬挑区域建立有限元模型如图 5、图 6 所示。

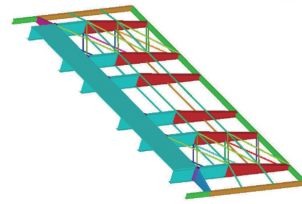


图 5 18 m 悬挑结构计算模型

Fig. 5 Calculation model of 18m cantilevered structure

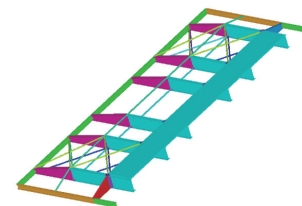


图 6 15 m 悬挑结构计算模型

Fig. 6 Calculation model of 15m cantilevered structure

图 5、图 6 所示的计算模型的结构体型系数为 1.4, 边界层风剖面幂指数 $\alpha = 0.16$ 。结构阻尼比为 0.02, 基本风压为 0.55 kN/m^2 , 承载力按基本风压的 1.1 倍设计。根据结构风振理论相关经验公式^[6], 得出风振模型各节点的静力风荷载和风振动力风荷载。而大跨度悬挑结构每个节点的静力等效风荷载, 由静力风荷载和风振动力风荷载两部分组成, 加上风荷载 P_{ci} , 即任意节点 i 上的 P_i 为:

$$P_i = P_{ci} + P_{di} = P_{ci} + g \sigma_{Pi} \quad (1)$$

本文仅讨论前三个振型的分析结果, 将各参

数代入公式，计算两种跨度悬挑结构的平均静力等效风荷载，结果如表 2 所示。

表 2 两种跨度的悬挑结构在不同振型下的静力等效风荷载

| 跨度 | 18 m 悬挑结构 | | | 15 m 悬挑结构 | | |
|----|------------|------------|------------|-------------|-------------|------------|
| | FX (N) | FY (N) | FZ (N) | FX (N) | FY (N) | FZ (N) |
| 1 | 0 | 1.1278E+03 | 3.5285E+03 | 0 | 6.2944E+02 | 2.0270E+03 |
| 2 | 5.5433E+03 | 0 | 4.5395E+04 | -1.8733E+03 | 0 | 1.8486E+04 |
| 3 | 0 | 2.225E+02 | -3.570E+03 | 0 | -5.9633E+02 | 3.8283E+03 |

取表 2 中的数值作为悬挑结构受到的最大静力等效风荷载，输入结构模型后，进行结构的抗震性能分析。

3 结构抗震性能分析

3.1 结构整体分析结果

小震和输入最大静力等效风荷载后的结构整体分析结果如表 3 所示，这里选用 YJK 结构计算软件建立了对照结构模型，确保模型和计算结果有效。

表 3 结构整体分析结果

Table 3 Overall structural analysis results

| 计算指标 | YJK 模型 | Midas/Gen 模型 | |
|--------------------|----------------|--------------------|--------------------|
| 结构自振模型/s | T ₁ | 0.8832 | 0.8920 |
| | T ₂ | 0.9411 | 0.9658 |
| | T ₃ | 0.8140 | 0.8326 |
| 有效质量系数 | X 向 | 90.36% > [90%] | — |
| | Y 向 | 99.91% > [90%] | — |
| 最大层间位移角 (小震作用) | X 向 | 1/1386 < [1/550] | 1/1416 < [1/550] |
| | Y 向 | 1/1311 [1/550] | 1/1340 < [1/550] |
| 最大层间位移角 (风荷载作用) | X 向 | 1/1029 < [1/550] | 1/1144 < [1/550] |
| | Y 向 | 1/1166 < [1/550] | 1/1212 < [1/550] |
| 最大位移比 (所在楼层) | X 向 | 1.14 < [1.50] (2层) | 1.20 < [1.50] (2层) |
| | Y 向 | 1.22 < [1.50] (2层) | 1.23 < [1.50] (2层) |

由表 3 结果可知，YJK 模型和 Midas/Gen 模型的计算结果虽有误差，但是与规范要求基本吻合。风荷载作用造成不规则大悬挑结构最大层间位移角增大，说明该结构对风荷载效应较为敏感。因此，在风荷载增大的情况下，不规则大悬挑结构会出现更大的位移。因此在进行类似结构形式的设计工作时，应将悬挑结构受到的静力等效风荷载纳入计算范畴，而不是简化计算，用平均风压来代替。

3.2 楼板受剪验算

在 2 层处，18 轴至 21 轴之间有大面积的开

洞，与悬挑桁架仅有一跨之遥，由于大开洞和悬挑桁架带来的影响，二者之间的楼板受力形式非常复杂。且楼板相对于其余结构构件脆性较为明显，抗剪能力较弱，对该楼板截面的受力进行验算，并针对性采取有效措施，对提升结构整体安全性有非常重要的意义。截面具体位置如图 7 所示，两截面跨度均为 9 m，板厚 200 mm。

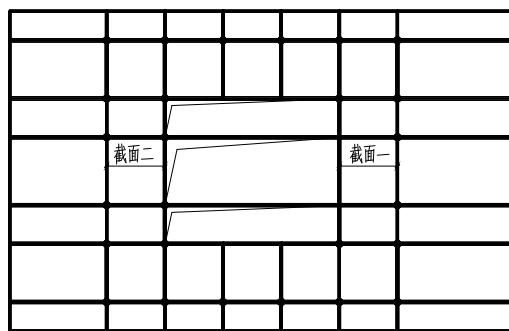


图 7 楼板受剪验算位置示意图

Fig. 7 Schematic diagram of the shear checking position of the floor slab

设楼板的混凝土强度等级为 C30，根据《高层建筑混凝土结构技术规程》(JGJ3--2010)^[7]可得 $f_{ck} = 20.1 \text{ MPa}$ ，在地震作用下楼板截面受剪验算的成立条件为

$$\gamma \leq 0.1 f_{ck} = 2.01 \text{ MPa} \quad (2)$$

受剪验算的荷载组合选择常用的 1.0 恒载 + 0.5 活载 + 1.0 大震作用组合^[8]。计算结果见表 4。

表 4 楼板受剪验算结果

Table 4 Shear calculation results of floor slabs

| | 截面一剪力 (kN) | 截面二剪力 (kN) |
|----------|---------------------|---------------------|
| 恒载作用 | 383 | 275 |
| 活载作用 | 163 | 208 |
| 大震作用 | 3063 | 2627 |
| 总剪力 | 3528 | 3006 |
| γ | 1.96MPa < [2.01MPa] | 1.67MPa < [2.01MPa] |

由表 4 可知，两截面受剪均满足要求。截面

建筑结构

二左侧的平面内钢结构桁架板厚为 250 mm，与截面二相差 50 mm，针对不同的板厚，荷载所引起的轴向变形有一定差异，在水平方向的楼板中，会产生较大的水平剪力，对楼板的刚度造成影响，容易引起刚度突变，而大跨度钢结构桁架整体结构和内部的杆件错落复杂^[9]，若混凝土楼板出现较大程度的收缩、变形，会影响到钢结构的安装精度，导致桁架出现更为严重的压缩变形，因此，应提前进行优化设计，根据竖向位移差，调整预埋件的标高，适当加长构件的尺寸，以平衡掉位移值；或者采用搭设临时支撑结构的方式，为桁架提供支撑点，提升稳定性。

截面一与右侧钢结构空腹桁架相连，但二者板厚相同，因此刚度差引起的水平剪力可以忽略。

3.3 楼板刚度对悬挑桁架受力及变形影响

为分析悬挑部位楼板刚度对悬挑桁架造成的影响，针对性地建立 3 个分析模型，楼板刚度分别为 100%、退化 50%、全部退化，其余条件相同，模拟悬挑桁架在楼板刚度逐渐退化的过程中，结构的受力和变形变化的情况。图 8 为桁架竖向变形输出点位置图。

经计算，当楼板刚度退化 $\leq 50\%$ 时，西侧平面内钢结构桁架悬挑根部和主体连接处的结构构件弯矩明显增大，轴向压力有所增加，个别构件有屈服的趋势，结构的稳定性明显下降。而东侧空腹桁架受楼板刚度变化的影响较小，且和三层的悬挑桁架通过竖杆、腹杆、弦杆紧密连接，因此平面外的一部分弯矩和拉力在这些杆件之间传递，

最终转移至三层。而三层刚度远超屋面，整体性较好，开洞和楼板刚度降低的影响被大大稀释，杆件受到的轴力和拉力没有明显变化，也没有发生屈服的情况。楼板刚度全部退化后，东西侧悬挑结构的各杆件受到显著影响，轴向压力和竖向位移均大幅增加，特别是下弦杆受影响尤为严重，处于屈服的边缘。

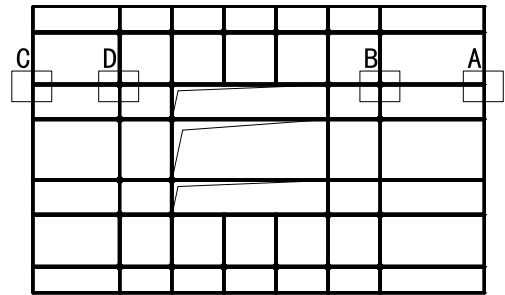


图 8 桁架竖向变形输出点位置图

Fig. 8 Vertical deformation output point position diagram of truss

表 5 为标准组合 1.0 恒载+1.0 活载作用下的悬挑桁架竖向变形相关结果。由表 5 可知，楼板刚度退化程度在 50%以内时，4 个输出点的竖向位移变化程度较小，但是楼板刚度完全退化后，竖向变形出现了较大的不同。此时 A 点（空腹桁架）的结构构件能够保持一定的承载能力，大部分构件未屈服，变形相对较小，而 C 点（平面内钢桁架）的结构构件此时处于屈服阶段，变形显著增大，位移差与跨度的比值超过了 A 点。而悬挑根部 C、D 点的竖向位移几乎没有变化，楼板刚度退化的影响可以忽视。

表 5 悬挑桁架的竖向变形

Table 5 Vertical deformation of cantilever truss

| 计算参数 | 楼板弹性刚度 100% | | | | 楼板刚度退化 50% | | | | 楼板刚度退化 100% | | | |
|------------|-------------|-------|-------|-------|------------|-------|-------|-------|-------------|-------|-------|-------|
| | A | B | C | D | A | B | C | D | A | B | C | D |
| 竖向位移绝对值/mm | 60.91 | 10.58 | 46.84 | 10.64 | 63.85 | 10.95 | 51.95 | 11.03 | 73.47 | 11.14 | 72.30 | 11.42 |
| 相对位移差/mm | | 50.33 | 36.20 | | | 52.9 | 40.92 | | | 62.33 | 60.88 | |
| 位移差与跨度比值 | | 1/357 | 1/414 | | | 1/340 | 1/366 | | | 1/288 | 1/246 | |

综上所述，楼板刚度被削弱时，平面内钢桁架容易进入屈服阶段，应采取一定的措施进行增强，如适当加大型钢翼缘和保护层厚度^[10]；悬挑前沿适当增设女儿墙^[11]，通过减少风荷载的方式间接降低结构受到的荷载；将钢梁与混凝土楼板连接处的钢钉用低弹性模量的材料包裹，增强整

体性^[12]。而空腹桁架各杆件基本不屈服，可按楼板刚度为零进行设计。

4 抗震关键部位优化设计

不规则大跨度悬挑结构的悬挑部分为抗震薄弱部位，其性能水准为小震弹性、大震不屈服^[13]。为

此, 在小震和大震两种荷载组合工况^{[14]-[15]}下对建筑物顶层的悬挑桁架及建筑主体的结构构件进行了单独的弹塑性有限元应力分析。计算结果见表 6。

由表 6 可以得出, 在工况 1 (小震) 条件下, 各构件受到的应力均小于 260 MPa, 结构处于弹性状态。在工况 2 (大震) 条件下, 绝大多数构件受到的应力小于 300 MPa, 西侧 15 m 平面内钢结构桁架的拐角处应力值在 400~450 MPa 的范围浮动, 仍在材料的极限强度范围内, 但东侧 18 m 空腹桁架因为悬挑长度较大, 拐角处受到的最大弯矩达到了 513 MPa, 超过了 Q345GJ 的最小极限强度, 需要采取一定措施进行增强。

表 6 结构层间最大位移角

| 工况组合 | 应用 MPa | 18 m 悬挑 | 15 m 悬挑 |
|------|--------|---------|---------|
| 工况 1 | 最小应力 | 155 | 106 |
| | 最大应力 | 259 | 174 |
| | 平均应力 | 223 | 148 |
| 大震工况 | 最小应力 | 292 | 171 |
| | 最大应力 | 513 | 395 |
| | 平均应力 | 482 | 322 |

本文采用在空腹桁架的下方增设一跨斜撑的方式进行增强处理^[16], 图 9 为结构计算模型。

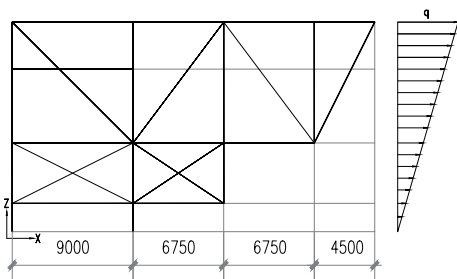


图 9 增设斜撑后的结构计算模型

Fig. 9 Structure calculation model after adding slant support

增设斜撑后, 结构的最大应力为 481 MPa, 相较于增设斜撑之前有 5% 左右的降低, 且小于 490 MPa, 满足要求。

在罕遇地震作用下, 结构的竖向位移是一项重要的抗震指标, 表 7 给出了小震、大震条件下增设斜撑前后的结构层间最大位移角。

表 7 结构层间最大位移角

| 最大层间位移角 | 有斜撑 | 无斜撑 |
|---------|--------|--------|
| 大震 | 1/212 | 1/178 |
| 小震 | 1/1504 | 1/1340 |

由表 7 可知, 工况 1 (小震) 条件下不规则大悬挑结构的最大层间位移角约为 1/1600, 小于规范规定的 1/550; 工况 2 (大震) 条件下不规则大悬挑结构的最大层间位移角为 1/250~1/180, 小于规范规定的 1/50 的限值, 提高了建筑整体的抗震性能。在局部布置斜撑的情况下, 结构的整体刚度有所提升, 最大层间位移角也有一定程度的降低, 但是影响甚微。

5 结论

本工程属于不规则大悬挑结构建筑, 针对大悬挑和不规则的特点, 进行了结构的整体分析和对悬挑结构和抗震关键节点的专项分析, 得出结论如下:

(1) 采用平面内钢结构桁架方案和钢结构空腹桁架方案, 分别对 15 m 和 18 m 悬挑长度的大悬挑结构进行优化设计和力学特性数值模拟分析, 根据计算结果, 抗震指标均满足要求, 方案可行。

(2) 根据分析结果, 不规则大跨度悬挑结构对风荷载的响应较为敏感, 为提升建筑结构的安全性, 应计算大悬挑部位的静力等效风荷载, 为结构构件的设计提供可靠依据。

(3) 分析楼板刚度对悬挑桁架受力及变形影响可知, 在悬挑长度相近的情况下, 平面内钢结构桁架对楼板刚度降低的敏感程度大于钢结构空腹桁架, 在楼板丧失刚度时会产生较大的应力, 从而产生较大的竖向位移。为消除这种不良影响, 应采取一定的额外措施, 来保障悬挑桁架的稳定性。

(4) 通过对悬挑桁架节点有限元分析可知, 大震时大悬挑结构将会引起巨大的应力, 悬挑结构的拐角部位容易出现应力集中的状况。采用增设斜撑的方式可以在一定程度上减小结构的最大应力和变形, 提升结构的稳定性。

参 考 文 献

- [1] 朴贤日, 崔帅, 刘勇, 等. 预应力框架结构在强震作用下的抗震性能研究 [J]. 地震工程与工程振动, 2022, 42 (3): 200-208.

岩土力学

- [7] 韩晶, 王乐华, 马莉, 等. 水泥及石灰掺量对改良膨胀土抗剪强度的影响 [J]. 人民黄河, 2015, 37 (4): 137-139+144.
- [8] 王佩, 宋新江, 徐海波, 等. 水泥改性膨胀土基本特性试验 [J]. 水利水电科技进展, 2021, 41 (3): 56-60.
- [9] 徐海波, 宋新江, 王佩, 等. 水泥改性膨胀土强度与变形特性试验研究 [J]. 南水北调与水利科技, 2019, 17 (4): 172-177.
- [10] 宁宝宽, 陈四利, 刘斌. 冻融循环对水泥土力学性质影响的研究 [J]. 低温建筑技术, 2004 (5): 10-12.
- [11] 姜伟昌. 基于 MICP 改良填筑膨胀土试验研究 [D]. 中南林业科技大学, 2020.
- [12] 陈晓龙, 梁川, 宋大勇. 燃煤发电企业固体废弃物的资源化利用研究综述 [J]. 东北电力技术, 2020, 41 (7): 27-30+59.
- [13] 陈瑜, 高英力, 王盛铭. 脱硫石膏-粉煤灰高性能化混凝土研究与应用 [J]. 公路交通科技, 2011, 28 (5): 33-38+97.
- [14] 艾志伟, 邓通发. 水泥土强度的影响因素研究进展 [J]. 公路, 2014, 59 (1): 195-199.
- [15] 张伟锋, 黄润秋, 裴向军, 等. 水泥土环境中粉煤灰水化与活性激发研究 [J]. 长春工程学院学报 (自然科学版), 2007 (1): 42-45.
- [16] 谢慧东, 张云飞, 栾佳春, 等. 脱硫石膏在水泥-粉煤灰-矿渣粉复合胶凝体系普通干混砂浆中的应用研究 [J]. 硅酸盐通报, 2011, 30 (3): 645-651.

(上接第 15 页)

- [2] 张新, 韩硕, 周广昊, 等. 连续悬挑混凝土结构支撑平台力学性能研究与应用 [J]. 施工技术 (中英文), 2022, 51 (12): 106-113.
- [3] 肖志, 陈立, 方伟明, 等. 扁长平面超限高层框筒结构设计 [J]. 建筑结构, 2021, 51 (21): 19-24+18.
- [4] 谭坚, 区彤, 张连飞, 等. 深圳机场卫星厅工程结构关键技术研究 [J]. 建筑结构, 2022, 52 (14): 41-49, 102.
- [5] 建筑抗震设计规范 (GB50011-2016) [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [6] 李玉学, 冯励睿, 李海云, 等. 考虑风振响应特性的多目标等效静力风荷载实用分析方法 [J]. 振动工程学报, 2022, 35 (1): 140-147.
- [7] 高层建筑混凝土结构技术规程: JGJ 3-2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [8] 王启文, 吴风利, 周斌, 等. 超限高层建筑大悬挑楼层结构设计 [J]. 建筑结构, 2016, 46 (22): 12-18.
- [9] 邢辉, 刘加俊, 汪安乐, 等. 大跨度钢筋桁架楼承板在钢结构住宅工程中的应用 [J]. 建筑技术, 2022, 53 (6): 720-722.
- [10] 冯方涛, 孙留洋, 王鹏, 等. 既有筒支 C 型钢檩条连续性加固后性能影响因素分析 [J]. 工程抗震与加固改造, 2021, 43 (5): 129-137.
- [11] 李七雄, 韩少龙, 梁恒越, 等. 砖砌女儿墙根部水平裂缝的处理措施 [J]. 建筑技术, 2022, 53 (10): 1363-1365.
- [12] 钟永, 武国芳, 陈勇平, 等. 结构用木竹材料弹性模量标准值确定方法 [J]. 建筑结构学报, 2021, 42 (2): 142-150, 177.
- [13] 韩小雷, 王雨, 张一璐, 等. RC 剪力墙结构小震与中震设计对比及其抗震性能研究 [J]. 地震工程与工程振动, 2021, 41 (1): 9-15.
- [14] 王建, 朱忠义, 周忠发, 等. 高位大跨度连体结构隔震减振多性能目标设计 [J]. 建筑结构学报, 2023, 44 (4): 54-62, 86.
- [15] 康谨之, 欧进萍. 消能减震结构抗超大震性能分析与设计 [J]. 合肥工业大学学报 (自然科学版), 2021, 44 (6): 794-800.
- [16] 刘晓蓬, 冯竟竟, 刘仲秋, 等. 3D 打印混凝土空腹重力坝的静力学数值模拟探讨 [J]. 硅酸盐通报, 2021, 40 (6): 1905-1910.