

雅丹观光塔钢屋盖不规则双层网格结构设计研究^①

王秀丽, 马肖彤

(兰州理工大学土木工程学院, 甘肃 兰州 730050)

摘 要:甘肃雅丹地貌观光塔的一层塔座外观奇特, 选用了不规则的双层钢网格结构作为其一层的屋盖。本文利用大型通用有限元分析软件 ANSYS 和空间网格结构计算机辅助设计软件 (MST2010) 分别对雅丹观光塔不规则双层网格钢屋盖结构进行了地震作用非线性时程分析以及风荷载作用分析; 根据分析结果初步得到结构的关键杆件, 并假设部分杆件受损对结构进行剩余承载力损伤评价。结果表明, 不规则网格钢屋面不仅能够很真实地体现出建筑外观, 而且还具有传统规则形式空间结构优良的抗震性能和抗风性能, 结构设计满足要求; 假设结构部分杆件出现损伤后, 通过结构剩余承载力评价的方法能够找出结构的关键杆件, 为后期的施工与使用提供指导。

关键词: 不规则网格结构; 地震作用; 时程分析; 风荷载; 损伤评价

中图分类号: TU312 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0844(2013)03-0575-07

DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2013.03.0575

Design Research on the Irregular Double Grid of the Yadan Sightseeing Tower

WANG Xiu-li, MA Xiao-tong

(School of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou, Gansu 730050, China)

Abstract: As architecture breaks away from traditional styles, grid structures with irregular spacing are in demand to meet construction requirements. An example of current architectural style is the Yadan sightseeing tower, which has an irregular double-layer steel grid roof. In this work, the engineering of such structures was reviewed and analyzed, and analysis and calculation of layered steel roof structures under seismic and wind loads were performed. The calculations assumed that part of the bar was damaged, and a damage assessment of the residual bearing capacity was conducted. Next, a finite element model that illustrated the loads imposed on the structure was built with analysis software. Then, a nonlinear time history analysis of earthquakes and a natural vibration analysis were done with the ANSYS finite element analysis software. Displacement curves showing the time history of key nodes and the stresses on key bars were obtained. Wind load analysis using computer-aided design software of the space grid structure (MST2010) was done, and displacement and stress distributions were obtained. Last, the analysis results indicated that some of the key bars assessed preliminarily might be damaged, so a damage assessment of the residual bearing capacity of the structure was undertaken. The results showed that the irregularly spaced grid structure in this project can be adapted to the current trends in architectural style. The grid not only reflects current architectural style but also has excellent seismic and wind

^① 收稿日期: 2013-04-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(51068019)

作者简介: 王秀丽(1963-), 女(汉族), 辽宁沈阳人, 教授, 博士, 博士生导师, 主要从事大跨空间钢结构研究。

Email: Maxt215@139.com

resistance performances, similar to those of the traditional spatial structure. Therefore, irregularly spaced grid structures are appropriate for use in similar projects with steel roofs. To assess earthquake response, the structure was subjected to structural vibration modes, and the weak parts were the head, tail, wings, and joints. Horizontal stiffness was greater than vertical stiffness. The structure was in a fully elastic state under the effects of multiple earthquakes; however, only a portion of the bar yielded under this rare earthquake scenario, and plastic deformation appeared in accordance with the basic principles of structural design. Parts of the bearing bars section should be increased at design time because it is a key member of the entire structure. Because a streamline design was adopted to resist wind, the design of this structure satisfies the requirements for wind resistance even in a hostile environment. In this study, the key bar calculations were very important to the bearing capacity of the structure. During structure construction and in service, great importance should be given to these bars. Once damage appears, the bars should be reinforced in a timely manner. The caseload design and analysis results can be combined for some practical projects, assuming some structural failure and through a method to evaluate structural residual strength to identify the key bars in the structure. Such projects would provide guidance for the structure's construction and later use.

Key words: irregularly spaced grid structure; earthquake action; time history analysis; wind load; damage assessment

0 前言

空间网格结构^[1]以其独有的空间活跃,造型优美,布置灵活,受力合理等特点在建筑设计中倍受人们的青睐。在工程实践中,随着建筑风格的丰富多样化,空间网格的形式也不再拘泥于规则型式的网架、网壳结构形式,为了能很好地符合建筑设计的要求,不规则空间网格形式的应用越来越多。本文讨论的位于甘肃西部戈壁所特有的雅丹地貌区的观光塔就采用了一种奇特外型下的不规则空间网格钢架结构。

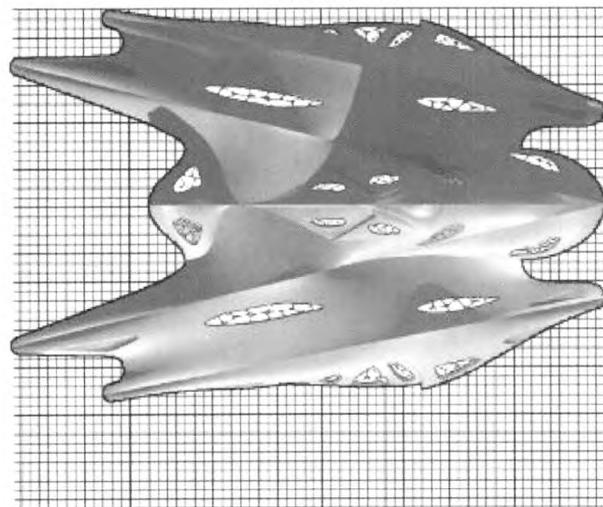
抗震设计^[2]和抗风设计是大跨空间结构设计的两个重要内容,雅丹又属于特殊环境地区,常年大风,因此本文主要从地震作用和风荷载作用两个方面对一层钢屋盖结构进行分析计算。根据计算结果假设部分杆件受损,并进行结构的剩余承载力损伤评价。

1 工程概况

雅丹观光塔“航舰出海”是位于甘肃西部的雅丹地貌国家级地质公园的重点建设项目和标志性建筑物,站在塔头部位要能够将整个雅丹地貌一览无余。在最初建筑选型时,为了能让结构很好地与周围环境相映融合,不会在周围的自然风景中显得太过突兀,最终确定选用在沙漠中航行的舰队建筑造型,建筑效果图如图1所示。观光塔共10层,一层为主展



(a) 建筑全景效果图



(b) 建筑平面效果图

图1 甘肃雅丹地貌观光塔建筑效果图

Fig. 1 Architectural renderings of sightseeing tower in the Yadan landform area of Gansu province.

厅及休闲会所,二到十层为观光电梯及消防楼梯,总建筑面积为 2 379.55 m²。主体塔身选用钢筋混凝土核心筒。一层屋盖由于建筑外观奇特,因此选用不规则的双层钢网格结构;同时考虑到结构处于常年大风恶劣环境,外表面通过采用多流线型的设计进行处理。

不规则网格钢屋盖结构主体为正放四角锥双层网架,杆件材料选用 Q235 钢,节点主要以螺栓球节点形式为主。下部支撑为钢筋混凝土柱,柱网布置与编号如图 2 所示。

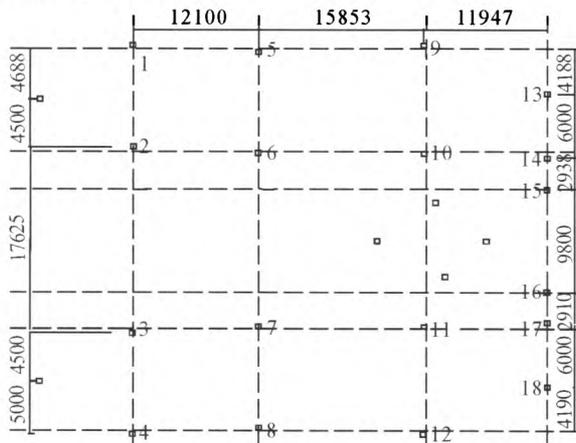


图 2 柱位布置与编号

Fig. 2 Column-layout and numbers.

2 有限元计算模型

本文采用空间网格结构计算机辅助设计系统 (MST2010),依据建筑效果图进行建模及杆件截面设计。采用 ANSYS 有限元分析软件建立有限元模型,屋盖尺寸为 56 m×40 m,网格尺寸大致为 2 m×2 m,厚度为 1 m。支撑柱高度从 7 m 到 1 m 不等,上部塔身对钢屋盖的约束作用通过在连接部位增加竖向支座模拟。有限元模型如图 3 所示。

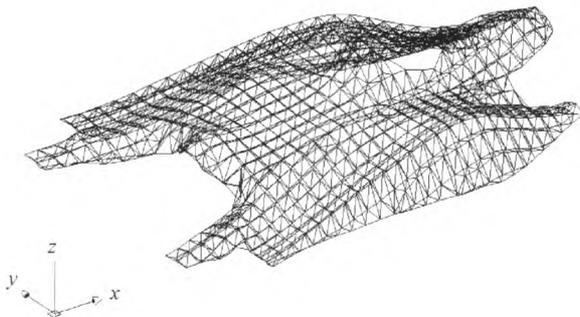


图 3 有限元模型图

Fig. 3 Diagram of the finite element model.

在利用 ANSYS 建立有限元模型的过程中,以

Link 8 单元模拟屋盖上下弦杆和腹杆,Beam 188 单元模拟下部支承混凝土柱,Mass21 质点单元模拟屋盖自重、上部屋面的质量及悬挂物的质量(上弦静载为 1.0 kN/m²、上弦活载 0.5 kN/m²、下弦静载为 0.2 kN/m²)。钢材采用双线性随动强化模型 (BKIN),泊松比取 0.3,密度 7 800 kg/m³,屈服强度 235 MPa。混凝土柱子^[3]采用多线性等向强化模型 (MISO),泊松比取 0.2,密度取 2 500 kg/m³,屈服强度取 30 MPa。

3 地震作用分析

3.1 地震作用下结构的运动方程

根据结构动力学相关知识,在地震作用^[4]下结构的运动方程为

$$[M]\{\ddot{U}\} + [C]\{\dot{U}\} + [K]\{U\} = -[M]\{\ddot{U}_g\} \quad (1)$$

式中,[M]、[C]、[K]依次为结构的质量、阻尼和刚度矩阵;{\ddot{U}}、{\dot{U}}、{U}依次为结构相对加速度、相对速度和相对位移向量;{\ddot{U}_g}为地面加速度向量,即时程分析时所输入的地震加速度向量。

3.2 结构自振分析

结构的自振特性是进行结构动力响应和抗震性能分析的基础。一般来说,网格结构^[5]前多阶自振频率和相应的振型对结构的位移和内力贡献占绝对优势。因此,采用子空间迭代法进行模态分析,取结构的前 50 阶振型进行研究(各阶固有频率与前四阶振型见图 4 所示)。本结构模型前 10 阶自振频率密集,结构振型比较明显,前两阶振型均为反对称变形,最大位移点在尾部悬挑处,说明结构发生反对称变形时刚度较差,第三阶阵型最大响应点在头部及两翼,其后为竖向振型和复杂的高阶振型。这些模态特征表明本网格结构应进行多向地震作用下的动力响应研究。

3.3 地震波的选取及调整

选用二类场地的 EL-CENTRO 南北方向、东西方向和竖直方向地震波记录,持时 14 s,时间间隔 0.02 s^[6]。加速度峰值分别按Ⅷ度多遇地震和Ⅷ度、Ⅸ度罕遇地震调整为 70 gal 和 400 gal,620 gal。调幅方法为^[7]

$$\alpha_0(t_i) = \alpha_{0,\max} / \alpha_m \alpha(t_i) \quad (2)$$

式中,\alpha_0(t_i)为输入的地震加速度;\alpha_{0,\max}为设计所需最大加速度;\alpha_m为地震记录中的加速度峰值;\alpha(t_i)为地震记录中的加速度。由于地震波的三向分量频谱特性并不相同,因此,三向输入地震记录时按 x:y:z = 1.0:0.85:0.65 调整,同时沿 X 轴(EL-

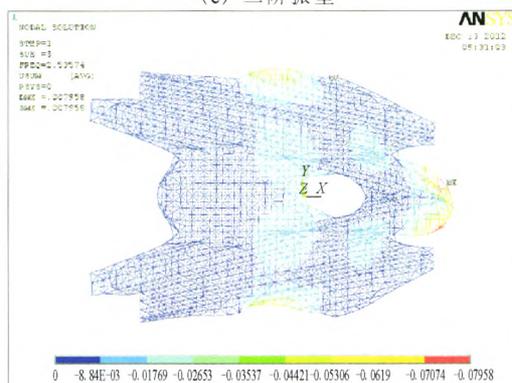
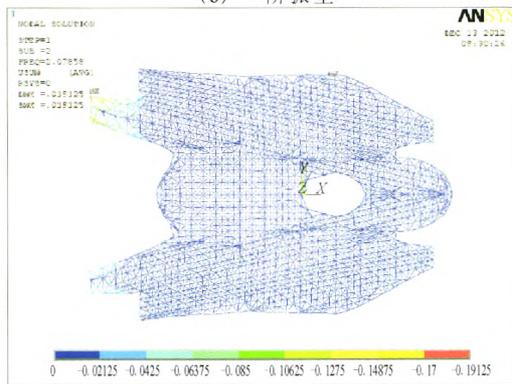
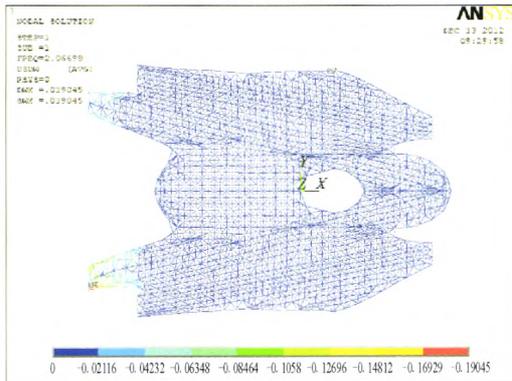
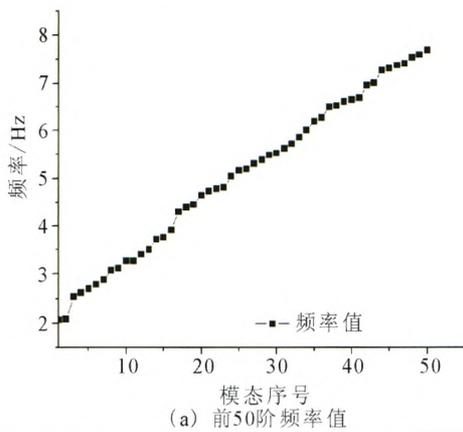


图4 各阶频率与振型

Fig. 4 The frequencies and mode shapes.

CENTRO 波南北方向)、Y轴(东西方向)、Z轴(竖直方向)输入。在进行时程分析时,考虑重力作用的

影响^[8]。

3.4 计算分析

利用 ANSYS 有限元软件分别进行多遇地震和罕遇地震作用下的非线性时程分析,分析时考虑结构的几何非线性(计算时打开大变形选项)和材料非线性。阻尼根据 Rayleigh 阻尼矩阵 $[C] = \alpha[M] + \beta[K]$ 来确定;质量矩阵阻尼系数 α 和刚度矩阵阻尼系数 β 可由模态分析所得的第 1、2 阶自振频率 f_1, f_2 和结构阻尼比 ζ (假设各阶振型阻尼比相同均为 ζ ,本结构由于带下部混凝土柱,考虑钢与混凝土的组合效应 ζ 取 0.035)利用公式(3)计算:

$$\alpha = \frac{4\pi f_1 f_2 \zeta}{\pi(f_1 + f_2)}, \quad \beta = \frac{\zeta}{\pi(f_1 + f_2)} \quad (3)$$

3.4.1 节点位移分析

在多遇地震和罕遇地震作用下结构的最大位移响应部位基本上是一致的,位移最大点均处于屋盖头部、尾部的悬挑处及两翼处,与结构振型变化相符。最大位移点的三向时程曲线如图 5 所示。在不同地震加速度峰值作用下,位移均为 X、Y 向较小,Z 向较大。多遇地震作用下:X 向最大位移为 16.64 mm,Y 向最大位移为 4.86 mm,Z 向最大位移为 88.87 mm;Ⅷ度罕遇地震作用下:X 向最大位移为 26.62 mm,Y 向最大位移为 27.41 mm,Z 向最大位移为 113.1 mm;Ⅸ度罕遇地震作用下:X 向最大位移为 38.46 mm,Y 向最大位移为 38.78 mm,Z 向最大位移为 187.1 mm。从图中可以看出,随着地震加速度峰值的增加,X 向和 Y 向位移响应增加较缓慢,而 Z 向位移响应急剧增大。说明该结构竖向刚度小于水平向刚度,三向位移增加值见表 1。

表 1 位移增加值

Table 1 Increased values of displacements

方向	位移 U/mm	
	400 gal	620 gal
X 向	9.98	21.82
Y 向	22.55	33.92
Z 向	24.23	98.23

3.4.2 构件应力分析

本屋盖为双层网架结构,杆件只受轴力的作用,取节点位移较大区域的 1581 号杆件及支座处的 3484 号杆件作为关键杆件进行受力分析,应力时程曲线如图 6 所示。从图中可以看出,多遇地震作用下杆件均没有发生屈服,最大应力为 191.4 MPa,结构安全系数为 1.228;Ⅷ度罕遇地震作用下开始有支座附近的杆件出现屈服;Ⅸ度罕遇地震作用时支座处发生屈服的杆件进一步增多,其余部位的杆件

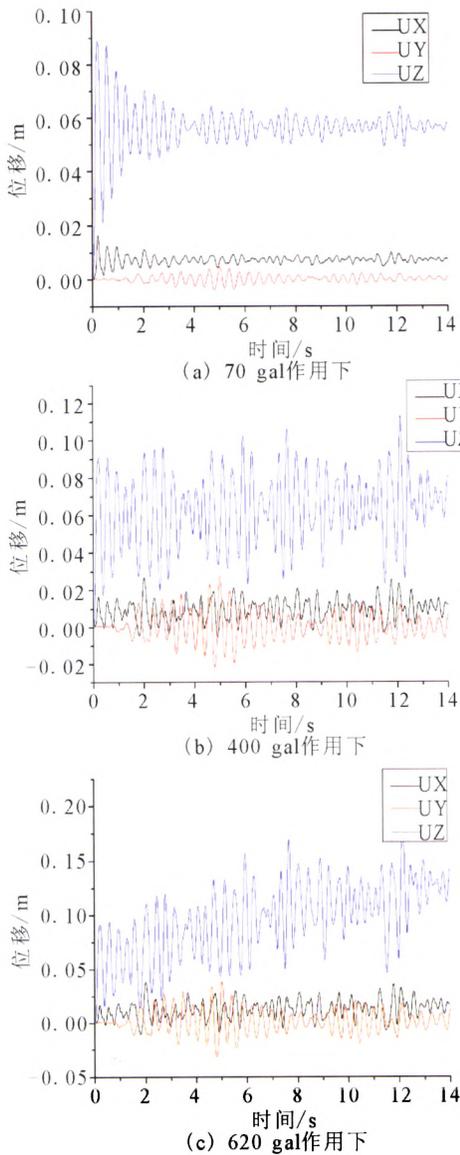


图 5 节点位移时程曲线

Fig. 5 Displacement time history curves of node.

未发生屈服,但最大应力达到了 210.2 MPa,结构安全系数为 1.118。结果表明在多遇地震作用下结构处于弹性阶段,而罕遇地震作用下结构开始进入塑性阶段,符合结构设计的原则。由于支座部位的杆件是整个结构的关键杆件,所以在设计时应该加大杆件截面。

4 风荷载作用分析

在结构风荷载作用分析时,同时考虑的设计荷载有:

- (1) 永久荷载:上弦静载 1.0 kN/m²,下弦静载 0.2 kN/m²,同时在计算过程中考虑结构自重。
- (2) 活荷载:屋面活载取 0.2 kN/m²。
- (3) 雪荷载:根据《建筑结构荷载规范》,雪荷载

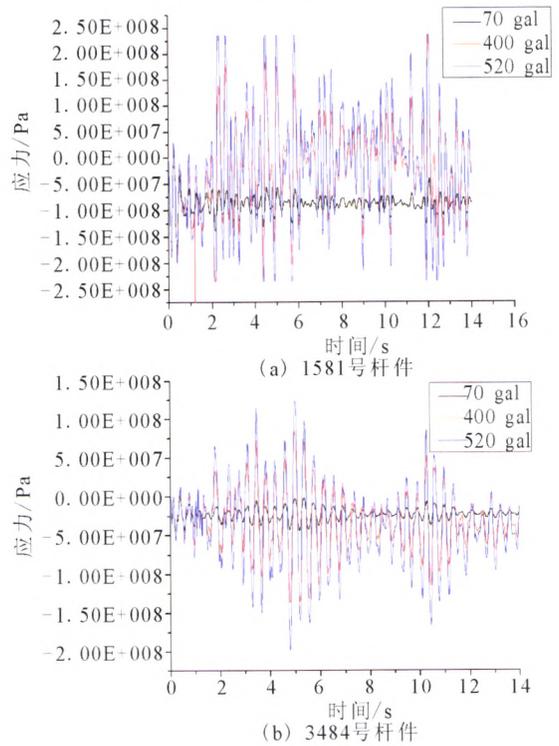


图 6 杆件应力时程曲线

Fig. 6 Stress time-history curves of bars.

标准值按屋面投影面积计算,其计算表达式为

$$s_k = \mu_r s_0 \tag{4}$$

式中: s_k 为雪荷载标准值(kN/m²); μ_r 为屋面积雪分布系数; s_0 为基本分压,按 50 年一遇考虑取 0.15 kN/m²。

(4) 风荷载:当地实测风速为 $v=36$ m/s,根据《建筑结构荷载规范》可以查得风荷载标准值

$$\omega_k = \beta_z \mu_s \mu_z \omega_0 \tag{5}$$

式中, β_z 为高度 z 处的阵风系数,本文计算取为 1.0; μ_s 为风荷载体型系数,取 0.7; μ_z 为风压高度变化系数,取 1.254; ω_0 为基本风压,取 $\omega_0 = v^2/1600=0.81$ kN/m²。

依据式(5)计算得 $\omega_k=0.711$ kN/m²,将风荷载值按节点所辖面积进行分配,利用空间网格结构计算机辅助设计系统(MST2010)考虑各种工况的荷载组合对结构进行抗风设计。

在风荷载作用下,结构在 X、Y 向变形为完全对称,头部和尾部悬挑处的位移最大,符合结构的变形规律。X 向最大位移 21.6 mm,Y 向最大位移 28.1 mm。Z 向位移最大处同样是头部和尾部的悬挑部位,最大位移为 38.3 mm。

观察应力分析结果得到风荷载作用下上弦杆件主要受压,下弦杆件主要受拉,支座处杆件为本结构

的关键杆件,应力最大为 192 MPa,结构安全系数为 1.218。

5 损伤评价

根据前文抗震分析和抗风分析得到的结果,得出结构的关键杆件位于支座处。假设每个支座处都有杆件发生了损伤,根据支座号依次去掉支座处这些关键杆件(每个支座去掉一根杆件,由支座 1 到支座 18 依次去除杆件)。通过计算剩余承载力的方法进行结构损伤评价。对完好结构和损伤结构分别进行非线性屈曲分析(将结构所受均布荷载等效为节点荷载)得到结构剩余承载力百分比,见表 2 所示。损伤杆件较少时,对结构的承载力影响也很小;当损

伤杆件增至 5 根时,承载力开始迅速下降;到拆除 18 根杆件时,承载力为完好结构承载力的 18.7%。

总体而言,损伤发生以后,结构会变“软”,各节点位移大多有不同程度地增加,而且损伤越严重,位移增加也越大;结构整体刚度减小,一阶频率会降低(表 3)。损伤的杆件越多,对结构刚度的削弱就会越大,同一节点的位移的增加也就越多。结构发生损伤后,损伤位置附近的杆件会发生内力重分配,结构位移变化最明显的是与受损杆件相连的节点和其附近的节点。这些特征都可以为以后实际工程中损伤的定位提供参考。

表 2 结构剩余承载力(kN)

Table 2 Residual capacity of the structure(kN)

杆件损伤数	完好	1	2	3	4	5	6	7	8
承载力	35.071	35.068	33.949	28.793	26.720	19.023	14.248	10.769	10.576
占完好比例	—	99.9%	96.8%	82.1%	76.2%	54.2%	40.6%	30.7%	30.1%
9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
9.909	9.677	9.658	9.644	9.239	9.083	8.876	8.743	7.885	6.863
28.3%	27.6%	27.5%	27.4%	26.3%	25.9%	25.3%	24.9%	22.5%	18.7%

表 3 自振频率

Table 3 Natural frequencies

杆件损伤数	完好	1	2	3	4	5	6	7	8
频率	2.0670	2.065	2.051	2.042	2.012	1.958	1.869	1.696	1.688
9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1.664	1.638	1.631	1.624	1.611	1.596	1.565	1.527	1.493	1.487

不同结构对不同构件的损伤敏感度不同,尤其是关键构件的损伤对结构的整体刚度影响十分大。在对大跨度空间结构实施健康监测或损伤定位及评价时,建议将重点放在内力较大的关键构件上,最终结合此类构件的变形及与该类构件相连或邻近部位的位移来实现对整体结构的监测。

6 结论

(1) 本工程不规则空间网格结构可以适应建筑造型奇特多样的变化趋势,不仅能够很真实地体现出建筑造型,而且还具有传统规则空间结构优良的抗震性能和抗风性能,因此,对于类似工程钢结构屋盖可以选择使用不规则的空间网格结构。

(2) 地震作用下结构的响应与结构振型相吻合,头部、尾部、两翼处和支座处均为本结构的薄弱部位,结构整体水平刚度较竖向刚度大;在多遇地震作用下结构处于完全弹性状态,而在罕遇地震作用下只有部分杆件屈服,结构出现塑性变形,符合结构设计的基本原则。由于支座部位杆件是整个结构的关键杆件,在设计时应加大截面。

(3) 虽然结构处于大风恶劣环境下,但由于设计时采用了有利于抗风的流线形造型,因此本结构设计亦满足抗风要求。

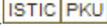
(4) 本文计算得出的关键杆件对结构的承载力十分重要,在结构施工和使用过程中对这些杆件要十分重视,若有损伤要及时加固。对一些实际工程可以结合各工况荷载设计分析的结果,假设结构部分杆件出现损伤,通过结构剩余承载力评价的方法找出结构的关键杆件,为后期的施工与使用提供指导。

参考文献(References)

- [1] 王秀丽. 大跨空间钢结构分析与概念设计[M]. 北京:机械工业出版社, 2008.
WANG Xiu-li. Analysis and Concept Design of Large Span Spatial Structure[M]. Beijing: China Machine Press, 2008. (in Chinese)
- [2] 夏坤,张令心,刘洁平. 建筑物高低层地震反应差异研究[J]. 西北地震学报, 2011, 33(3): 284-290.
XIA Kun, Zhang Lin-xin, LIU Jie-ping. Study on Difference between Seismic Response of Lower Stories and that of Higher

- Stories of Building[J]. Northwestern Seismological Journal, 2011,33(3):284-290. (in Chinese)
- [3] 杜永峰,仲彬. 施工过程中隔震层钢筋砼梁变形初步分析[J]. 地震工程学报,2013,35(1):29-41.
DU Yong-feng, WEI Zhong-bin. Preliminary Analysis on Deformation of Reinforced Concrete Beam of Isolation Layer during Construction Process[J]. China Earthquake Engineering Journal,2013,35(1):29-41. (in Chinese)
- [4] 郭安宁,郭增建,焦姣. 青海玉树 7.1 级大震的预测讨论[J]. 西北地震学报,2012,34(1):39-43.
GUO An-ning, GUO Zeng-jian, JIAO jiao. Discussion on the Prediction of the Yushu $M_s7.1$ Earthquake in Qinghai province in 2010 [J]. Northwestern Seismological Journal, 2012, 34 (1):39-43. (in Chinese)
- [5] 刘进军,刘枫,朱礼敏,等. 中国航海博物馆曲面幕墙单层索网结构设计[J]. 建筑结构,2011,41(3):7-10.
LIU Jun-jin, LIU Feng, ZHU Li-min, et al. Structure Design of Single Layer Cable Net Curve Curtain Wall of China Maritime Museum[J]. Building Structure, 2011, 41(3): 7-10. (in Chinese)
- [6] 薛素铎,赵均,高向宇. 建筑抗震设计[M]. 北京:科学出版社, 2005.
XUE Su-duo, ZHAO Jun, GAO Xiang-yu. Seismic Design of Buildings[M]. Beijing: Science Press,2005. (in Chinese)
- [7] 杨溥,李英民,赖明. 结构时程分析法输入地震波的选择控制指标[J]. 土木工程学报,2000,33(6): 33-37.
YANG Fu, LI Ying-ming, NAI Ming. A New Method for Selecting Inputting Waves for Time-history Analysis[J]. China Civil Engineering Journal, 2000,33(6): 33-37. (in Chinese)
- [8] 刘飞,汪大海,许敏. 某超限大跨度结构弹塑性地震反应分析[J]. 土木工程学报,2010,43(11): 27-36.
LIU Fei, WANG Da-hai, XU Min. Analysis of the Elastoplastic Seismic Response of An Ultra Large Span Structure [J]. China Civil Engineering Journal, 2010,43(11): 27-36. (in Chinese)

雅丹观光塔钢屋盖不规则双层网格结构设计研究

作者: 王秀丽, 马肖彤, WANG Xiu-li, MA Xiao-tong
作者单位: 兰州理工大学土木工程学院, 甘肃兰州, 730050
刊名: 地震工程学报 
英文刊名: China Earthquake Engineering Journal
年, 卷(期): 2013, 35(3)

本文链接: http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_xbdzxb201303029.aspx