

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.202107018

## 下部结构对大跨空间枢纽结构地震响应的放大效应分析\*

李忠献<sup>1,2</sup>, 武英英<sup>2</sup>, 丁阳<sup>1,2</sup>, 石运东<sup>1,2</sup>, 宗亮<sup>1,2</sup>

(1. 天津大学滨海土木工程结构与安全教育部重点实验室, 天津 300350; 2. 天津大学建筑工程学院, 天津 300350)

**摘要:** 大跨空间枢纽结构是重要的城市生命线工程, 地震作用下一旦发生破坏将造成巨大的社会影响。与传统大跨空间结构不同, 大跨空间枢纽结构除上部屋盖结构外, 还建有刚度较大的下部结构, 整体结构形式复杂。因此针对大跨空间枢纽结构的特点, 选取了典型的大跨空间网架枢纽结构和管桁架枢纽结构, 采用有限元软件 ABAQUS 分析了下部结构对大跨空间枢纽结构地震响应的影响规律及机理。结果表明, 相比仅考虑屋盖结构, 考虑下部结构时大跨空间枢纽结构自振频率相比仅考虑屋盖结构时明显降低, 结构前十阶自振频率最大相差约 20.2%。此外, 考虑下部结构会使大跨空间枢纽结构屋盖的动力响应明显增大, 屋盖节点的三向加速度响应相比仅考虑屋盖结构时增大约 15.8%~248.6%, 节点三向相对位移响应增大约 3.8%~453.1%, 杆件应力增大约 0.1%~125.1%, 因此在设计时有必要对大跨空间枢纽结构进行整体结构计算分析。

**关键词:** 大跨空间枢纽结构; 空间网架; 空间管桁架; 下部结构; 放大效应

**中图分类号:** TU443 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2021)04-0823-14

## Amplification Effect Analysis of Substructure on Seismic Response of Large-Span Spatial Hub Structure

LI Zhongxian<sup>1,2</sup>, WU Yingying<sup>2</sup>, DING Yang<sup>1,2</sup>, SHI Yundong<sup>1,2</sup>, ZONG Liang<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Coast Civil Structures Safety of Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300350, China;

2. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350, China)

**Abstract:** The large-span spatial hub structure is an important urban lifeline project. Once damaged in earthquakes, it would cause huge social impact. Differing from the traditional large-span spatial structure, the large-span spatial hub structure has a lower structure with high stiffness besides the upper roof structure, and the overall structure form is complex. Therefore, aiming at the characteristics of large-span spatial hub structure, the typical large-span spatial grid hub structure and pipe truss hub structure are selected as studied objects. The influence law and mechanism of substructure on seismic response of large-span spatial hub structure are analyzed by using the finite element software ABAQUS. The results show that the natural frequencies of long-span spatial hub structure with sub-

\* 收稿日期: 2021-07-18; 修回日期: 2021-08-27

基金项目: 国家重点研发计划课题(2018YFC1504304)资助

作者简介: 李忠献(1961—), 男, 教授, 博导, 博士。主要从事结构工程与防灾减灾研究。E-mail: zlxli@tju.edu.cn

通讯作者: 丁阳(1966—), 女, 教授, 博导, 博士。主要从事钢结构与空间结构及其抗灾性能研究。

E-mail: dingyang@tju.edu.cn

structure are significantly lower than those with roof structure only, and the maximum difference of the first ten natural frequencies is about 20.2%. In addition, considering the substructure will significantly increase the dynamic response of the roof of the long-span spatial hub structure, the three-dimensional acceleration response of the roof node increases by 15.8%~248.6%, the three-dimensional relative displacement response of the node increases by 3.8%~453.1%, and the member stress increases by 0.1%~125.1%. Therefore, it is necessary to calculate and analyze the overall structure of long-span spatial hub structure in design.

**Keywords:** the large-span spatial hub structure; spatial grid structure; spatial pipe truss structure; substructure; amplification effect

## 引言

随着我国经济实力的增长和交通运输事业的发展,枢纽车站的建设大量兴起,作为城市的交通枢纽和集散中心,承担着推动城市经济发展的重大作用。与体育场馆和会展中心等传统大跨空间结构不同,由于建筑功能的需要,大跨空间枢纽结构除上部屋盖结构外,还建有包含站台层、高架候车层和商业用房等用途的下部结构,整体结构形式复杂。

在工程设计中,为了简化计算,常将上部的大跨度屋盖结构与下部支承结构分开考虑,并采用简支支承、固定铰支承或弹性支承等不同的支座形式考虑下部结构的作用<sup>[1]</sup>,但实际上,上部的大跨空间结构支承于下部结构上,将两者分开考虑无法真实反映结构的受力性能。一些学者对考虑下部结构的大跨空间结构进行了研究<sup>[2-11]</sup>,通过对上部屋盖结构的单独模型和考虑下部结构的整体模型进行静力或动力荷载作用下的响应对比分析,研究了考虑下部结构对大跨空间结构静动力性能的影响。但目前的研究主要以形式简单的网架结构或网壳结构作为研究对象,且下部支承体系多为简单的周边柱支承,而大跨空间枢纽结构屋盖形式多样,且下部结构体量庞大,其在地震作用下的响应规律和机理更加复杂。

因此,本文以大跨空间网架枢纽结构和大跨空间管桁架枢纽结构为研究对象,采用有限元软件 ABAQUS 建立了考虑下部结构的整体结构有限元模型,对大跨空间枢纽结构进行抗震性能分析,研究下部结构对大跨空间枢纽结构地震响应的影响规律及机理。

## 1 典型大跨空间枢纽结构有限元模型建立

### 1.1 大跨空间枢纽结构选型及特点

通过对国内大跨空间枢纽结构的调研总结,大跨空间枢纽结构屋盖形式以管桁架结构、网架结构和网壳结构为主,下部结构多为钢筋混凝土框架结构<sup>[12-15]</sup>。本文选取了典型的大跨空间网架枢纽结构和大跨空间管桁架枢纽结构。大跨空间网架枢纽结构下部为钢筋混凝土框架结构,平面横向为 140 m,纵向为 218 m,上部屋盖为正交正放四角锥曲面网架结构,平面纵向为 169.8 m,横向为 115 m,屋盖由 8 榀主竖向构件支承在下部结构上,其中纵向两端为两榀主拱,主拱矢高为 16 m,跨度为 68 m,此外沿纵向由 6 榀 V 形变截面箱型斜柱支承网架屋盖。大跨空间管桁架枢纽结构下部为钢筋混凝土框架结构,平面横向为 288 m,纵向为 261 m,上部屋盖为鱼腹式钢桁架结构,平面横向为 176 m,纵向为 246 m,由两侧的平屋面部分和中部的屋脊拱起部分构成。屋盖结构由圆形钢管立柱和 V 形斜柱支承于下部结构。

### 1.2 有限元计算模型

本文采用 ABAQUS 建立结构有限元计算模型。上部屋盖杆件及下部结构梁、柱采用 B32 梁单元,梁、柱中的钢筋采用组合单元法,通过在两个节点之间建立钢筋梁单元和混凝土梁单元组合模拟钢筋混凝土单元,板、墙采用 S4R 壳单元,板、墙中的钢筋采用钢筋纤维法,截面各层的钢筋属性通过添加 \*Rebar Layers 关键字实现。结构重力荷载代

表值以质量单元的形式施加在相应节点上,分析考虑整个结构的几何非线性。大跨空间枢纽结构有限元模型如图1所示。

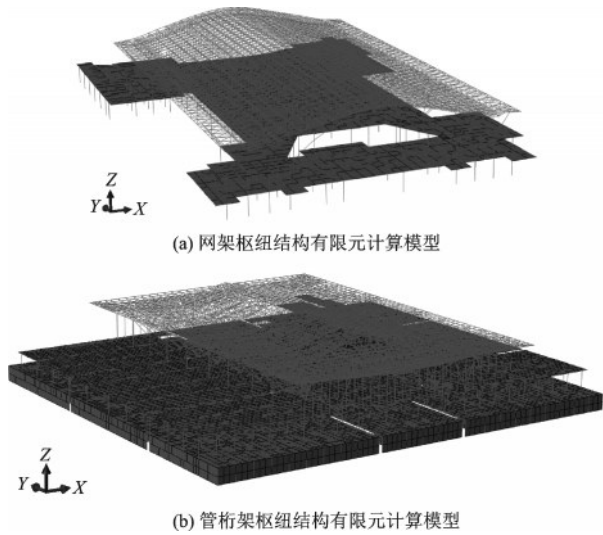


图1 大跨空间枢纽结构有限元计算模型

Fig.1 Finite element calculation model of large-span spatial hub structure

### 1.3 地震波的选取

本文采用基于规范设计反应谱平台段和结构基本自振周期段的两频率段控制的选波方法<sup>[16]</sup>,分别针对大跨空间网架枢纽结构和管桁架枢纽结构选取两条实际强震记录并人工模拟一条加速度时程曲线。大跨空间网架枢纽结构抗震设防烈度为7度,设计基本地震加速度为0.15g,设计地震分组为第二组,建筑场地类别为II类,根据《建筑抗震设计规范》<sup>[17]</sup>,场地特征周期为0.45 s,地震影响系数最大值为0.72。大跨空间管桁架枢纽结构抗震设防烈度为8度,设计基本地震加速度为0.20g,设计地震分组为第二组,建筑场地类别为III类,根据《建筑抗震设计规范》<sup>[17]</sup>,场地特征周期为0.60 s,地震影响系数最大值为0.90。此外,由结构动力特性分析,大跨空间网架枢纽结构基本自振周期为1.14 s,管桁架枢纽结构基本自振周期为0.68 s。

所选地震波持续时间为15 s,时间步长为0.005 s,将选取的地震波调幅后按照1(水平向):0.85(水平向):0.65(竖向)的比例输入。表1和表2分别为大跨空间网架枢纽结构和管桁架枢纽结构的地震波选取记录,图2为选取的地震波加速度反应谱。由图2可以看出,选取的地震波平均加速度反应谱与结构规范设计反应谱拟合较好。

表1 大跨空间网架枢纽结构地震波选取记录

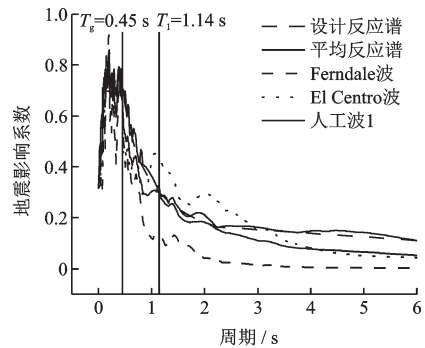
Table 1 Selection of seismic wave records for large-span spatial grid hub structure

| 地震名称               | 震级   | 记录时间 | 记录台站                |
|--------------------|------|------|---------------------|
| Northwest Calif-03 | 5.8  | 1951 | Ferndale City Hall  |
| Imperial Valley-06 | 6.53 | 1979 | El Centro Array #12 |
| 人工波1               | —    | —    | —                   |

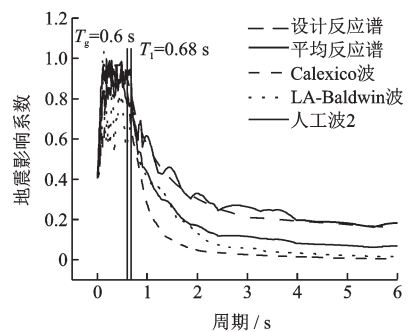
表2 大跨空间管桁架枢纽结构地震波选取记录

Table 2 Selection of seismic wave records for large-span spatial pipe truss hub structure

| 地震名称                | 震级   | 记录时间 | 记录台站                  |
|---------------------|------|------|-----------------------|
| Imperial Valley-07  | 5.01 | 1979 | Calexico Fire Station |
| Whittier Narrows-02 | 5.27 | 1987 | LA-Baldwin Hills      |
| 人工波2                | —    | —    | —                     |



(a) 网架枢纽结构



(b) 管桁架枢纽结构

图2 大跨空间枢纽结构地震波加速度反应谱

Fig.2 Seismic acceleration response spectrum of large-span spatial hub structure

## 2 考虑下部结构的大跨空间枢纽结构抗震性能分析

### 2.1 结构动力特性分析

采用迭代Lanczos法对仅考虑屋盖结构和考虑下

部结构的大跨空间网架枢纽结构及管桁架枢纽结构进行自振特性分析。表3和表4分别为大跨空间网架枢纽结构及管桁架枢纽结构的前10阶自振频率。

表3 仅考虑屋盖结构和考虑下部结构的大跨空间网架枢纽结构自振频率

Table 3 Natural frequencies of large-span spatial grid hub structure considering only roof structure and substructure

| 单位:Hz |         |        |             |
|-------|---------|--------|-------------|
| 模态阶数  | 仅考虑屋盖结构 | 考虑下部结构 | $\delta/\%$ |
| 1     | 1.07    | 0.88   | -17.6       |
| 2     | 1.54    | 1.23   | -20.2       |
| 3     | 1.55    | 1.28   | -17.4       |
| 4     | 2.09    | 1.68   | -19.7       |
| 5     | 2.12    | 2.00   | -5.7        |
| 6     | 2.19    | 2.04   | -6.9        |
| 7     | 2.34    | 2.18   | -6.7        |
| 8     | 2.37    | 2.22   | -6.2        |
| 9     | 2.38    | 2.24   | -5.8        |
| 10    | 2.46    | 2.33   | -5.3        |

注:表中 $\delta=(\text{考虑下部结构的结构自振频率}-\text{仅考虑屋盖结构的自振频率})/\text{仅考虑屋盖结构的自振频率}\times 100\%$

表4 仅考虑屋盖结构和考虑下部结构的大跨空间管桁架枢纽结构自振频率

Table 4 Natural frequencies of large-span spatial pipe truss hub structure considering only roof structure and substructure

| 单位:Hz |         |        |             |
|-------|---------|--------|-------------|
| 模态阶数  | 仅考虑屋盖结构 | 考虑下部结构 | $\delta/\%$ |
| 1     | 1.80    | 1.48   | -17.9       |
| 2     | 1.81    | 1.71   | -5.5        |
| 3     | 1.85    | 1.76   | -5.0        |
| 4     | 2.00    | 1.80   | -9.7        |
| 5     | 2.12    | 1.83   | -13.8       |
| 6     | 2.13    | 1.85   | -13.0       |
| 7     | 2.27    | 1.87   | -17.8       |
| 8     | 2.32    | 1.89   | -18.4       |
| 9     | 2.35    | 1.95   | -17.3       |
| 10    | 2.50    | 2.00   | -20.1       |

注:表中 $\delta=(\text{考虑下部结构的结构自振频率}-\text{仅考虑屋盖结构的自振频率})/\text{仅考虑屋盖结构的自振频率}\times 100\%$

由表3和表4可以看出,大跨空间枢纽结构的前10阶自振频率分布较密集,体现了结构动力特性的复杂性。考虑下部结构的大跨空间网架枢纽结

构和管桁架枢纽结构相比仅考虑屋盖结构时自振频率均明显降低,最大相差20.2%。这是由于考虑下部结构时,屋盖支承在下部结构上,支承柱柱底与下部结构的梁柱相连,共同发生变形,相比仅考虑屋盖结构时,屋盖底部的约束减弱,使结构变柔,所以考虑下部结构时结构的自振频率降低。

## 2.2 考虑下部结构对网架枢纽结构地震响应影响分析

### 2.2.1 屋盖节点加速度响应分析

为分析考虑下部结构对网架枢纽结构加速度响应的影 响,选取具有代表性的屋盖跨中节点,其位置如图3所示。

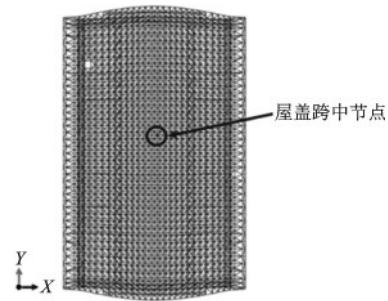


图3 大跨空间网架枢纽结构屋盖跨中节点示意

Fig.3 Schematic diagram of mid span node on roof of large-span spatial grid hub structure

在地震加速度峰值分别为150 gal和310 gal的Ferndale波、El Centro波和人工波1作用下,得到屋盖跨中节点的加速度时程响应峰值并列于表5,工况1代表仅考虑屋盖结构,工况2代表考虑下部结构。为定量分析考虑下部结构对大跨空间枢纽结构地震响应的影 响,定义系数 $\alpha$ 为:

$$\alpha = \frac{(b_{\max} - a_{\max})}{a_{\max}} \times 100\% \quad (1)$$

式中, $a_{\max}$ 为仅考虑屋盖结构的地震响应峰值; $b_{\max}$ 为考虑下部结构的地震响应峰值。

图4为仅考虑屋盖结构和考虑下部结构时屋盖跨中节点在310 gal的Ferndale波作用下的加速度时程曲线,限于篇幅,El Centro波和人工波1作用下的加速度时程曲线不再给出。

由图4可以看出,在Ferndale波作用下,考虑下部结构的网架枢纽结构屋盖跨中节点的X、Y、Z三向加速度响应相比仅考虑屋盖结构时均明显增大。由表5分析可得,在不同地震波和不同地震加速度峰值作用下,网架枢纽结构屋盖跨中节点的加速度

表5 大跨空间网架枢纽结构屋盖跨中节点加速度响应峰值

Table 5 Peak acceleration response of mid span node on roof of large-span spatialgrid hub structure

单位:  $m/s^2$

|    |             | 150 gal  |           |       | 310 gal  |           |       |
|----|-------------|----------|-----------|-------|----------|-----------|-------|
|    |             | Ferndale | El Centro | 人工波 1 | Ferndale | El Centro | 人工波 1 |
| X向 | 工况 1        | 2.0      | 2.6       | 3.2   | 4.2      | 6.3       | 6.2   |
|    | 工况 2        | 4.2      | 5.7       | 6.4   | 8.0      | 9.6       | 12.1  |
|    | $\alpha/\%$ | 107.8    | 123.8     | 104.3 | 92.9     | 51.4      | 95.4  |
| Y向 | 工况 1        | 1.8      | 2.7       | 2.3   | 3.8      | 4.2       | 4.5   |
|    | 工况 2        | 3.5      | 4.9       | 3.9   | 7.4      | 11.3      | 8.4   |
|    | $\alpha/\%$ | 89.0     | 83.5      | 73.0  | 97.6     | 171.1     | 86.9  |
| Z向 | 工况 1        | 3.5      | 2.2       | 4.1   | 7.8      | 6.6       | 9.7   |
|    | 工况 2        | 6.0      | 5.3       | 9.5   | 15.1     | 12.0      | 16.2  |
|    | $\alpha/\%$ | 71.4     | 141.9     | 130.1 | 93.9     | 82.7      | 66.6  |

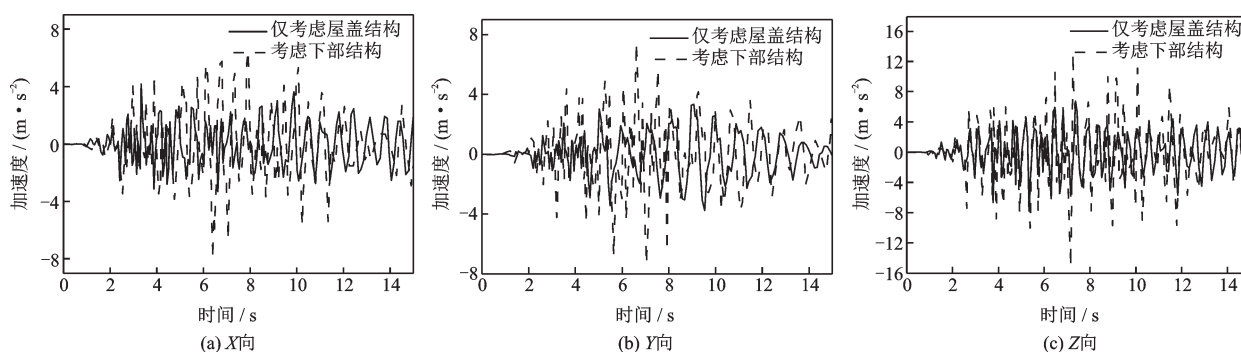


图4 310 gal Ferndale波作用下屋盖跨中节点加速度时程曲线

Fig.4 Acceleration time history curve of the middle node of roof span under the action of 310 gal Ferndale wave

峰值系数  $\alpha$  均大于零,且数值较大,约为 51.4%~171.1%,表明考虑下部结构会较大程度地增大网架枢纽结构屋盖节点的加速度响应。这是由于网架枢纽结构下部具有较大的质量和刚度,而上部屋盖的质量和刚度相对较小,在地震作用下结构底部的地震动在向上传递的过程中被放大,因此屋盖节点的地震加速度响应相比仅考虑屋盖结构时得到了较大程度的增大。

### 2.2.2 屋盖节点位移响应分析

同样选取屋盖跨中节点作为研究对象,通过分析不同地震作用下屋盖跨中节点的相对位移(相对于屋盖支承柱柱顶节点)研究考虑下部结构对网架枢纽结构屋盖变形的影响。

在地震加速度峰值分别为 150 gal 和 310 gal 的 Ferndale 波、El Centro 波和人工波 1 作用下,得到屋盖跨中节点的相对位移时程响应峰值并列于表 6,工况 1 代表仅考虑屋盖结构,工况 2 代表考虑下部结构。图 5 为仅考虑屋盖结构和考虑下部结构时屋盖跨中节点在 310 gal 的 Ferndale 波作用下的相对

位移时程曲线,限于篇幅,El Centro 波和人工波 1 作用下的相对位移时程曲线不再给出。

由图 5 可以看出,在 Ferndale 波作用下,考虑下部结构的网架枢纽结构屋盖跨中节点的 X、Y、Z 三向相对位移响应相比仅考虑屋盖结构时均明显增大。由表 6 可以看出,在基本烈度和高于设防烈度的罕遇地震作用下,网架枢纽结构屋盖节点的相对位移较小,说明正交正放四角锥网架结构具有较好的整体性。由表 6 还可以得出,在不同地震波和不同地震加速度峰值作用下,网架枢纽结构屋盖跨中节点的相对位移峰值系数  $\alpha$  均大于零,且数值较大,约为 52.0%~227.3%,表明考虑下部结构会较大程度地增大网架枢纽结构屋盖的变形。这是由于相比仅考虑屋盖结构,考虑下部结构会放大屋盖的地震响应,屋盖变形也因此增大,此外考虑下部结构时屋盖支承柱柱底的约束减弱,使结构变柔,也会增加屋盖的变形,因此考虑下部结构时网架枢纽结构屋盖跨中节点的相对位移较仅考虑屋盖结构时明显增大。

表 6 大跨空间网架枢纽结构屋盖跨中节点相对位移响应峰值

Table 6 Peak relative displacement response of the node in the span of the roof of the large-span spatial grid hub structure

单位: mm

|    |             | 150 gal  |           |       | 310 gal  |           |       |
|----|-------------|----------|-----------|-------|----------|-----------|-------|
|    |             | Ferndale | El Centro | 人工波 1 | Ferndale | El Centro | 人工波 1 |
| X向 | 工况 1        | 5.7      | 7.4       | 11.1  | 10.9     | 14.5      | 21.9  |
|    | 工况 2        | 15.2     | 17.9      | 23.1  | 30.4     | 47.3      | 60.0  |
|    | $\alpha/\%$ | 169.4    | 143.5     | 108.6 | 178.2    | 227.3     | 174.2 |
| Y向 | 工况 1        | 6.2      | 6.2       | 6.5   | 12.5     | 12.9      | 13.9  |
|    | 工况 2        | 12.7     | 16.5      | 15.5  | 25.7     | 36.7      | 21.0  |
|    | $\alpha/\%$ | 106.0    | 165.9     | 137.5 | 105.5    | 183.7     | 52.0  |
| Z向 | 工况 1        | 10.9     | 5.0       | 13.6  | 24.8     | 13.2      | 27.3  |
|    | 工况 2        | 20.3     | 15.0      | 29.0  | 44.4     | 30.0      | 61.2  |
|    | $\alpha/\%$ | 86.7     | 199.7     | 113.9 | 78.8     | 126.5     | 123.9 |

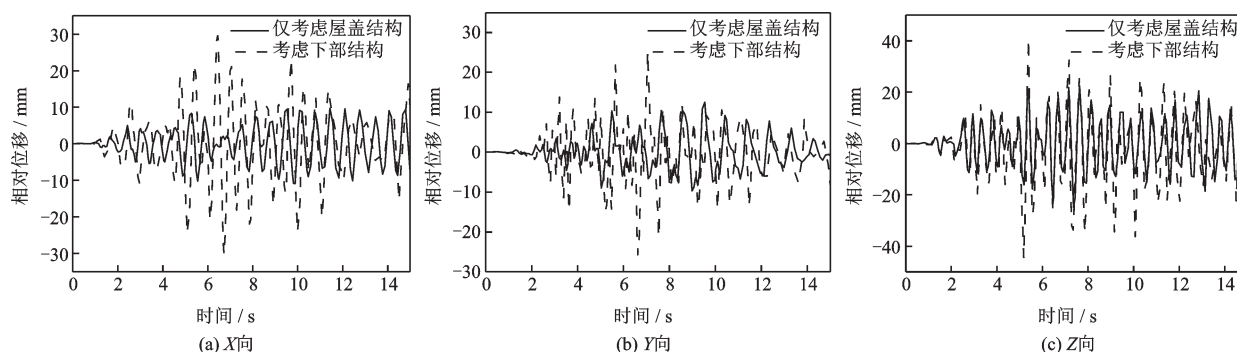


图 5 310 gal Ferndale 波作用下屋盖跨中节点相对位移时程曲线

Fig.5 Relative displacement time history curve of roof mid span node under 310 gal Ferndale wave

### 2.2.3 屋盖杆件应力响应分析

为分析考虑下部结构对网架枢纽结构杆件应力响应的影响,选取屋盖跨度方向的杆件如图 6 所示,将杆件分为上弦杆、腹杆和下弦杆三类并编号。图 7 为所选杆件在 310 gal 的 Ferndale 波作用下的应力时程峰值图,限于篇幅,其余工况下的杆件应力时程峰值图不再给出。

由图 7 可以看出,正交正放四角锥网架结构在 地震作用下的杆件应力分布具有以下规律:无论上

弦杆、腹杆还是下弦杆,杆件应力均在屋盖支承处最大。对于上弦杆,杆件应力在屋盖边跨分布较为均匀,在中跨杆件应力较小,对于腹杆和下弦杆,杆件应力在边跨和中跨的跨中都较小。此外可以看出,仅考虑屋盖结构和考虑下部结构时网架枢纽结构屋盖的杆件应力分布规律没有发生变化,但相比仅考虑屋盖结构,考虑下部结构时无论上弦杆、腹杆还是下弦杆,网架枢纽结构屋盖杆件应力均不同程度地增大。

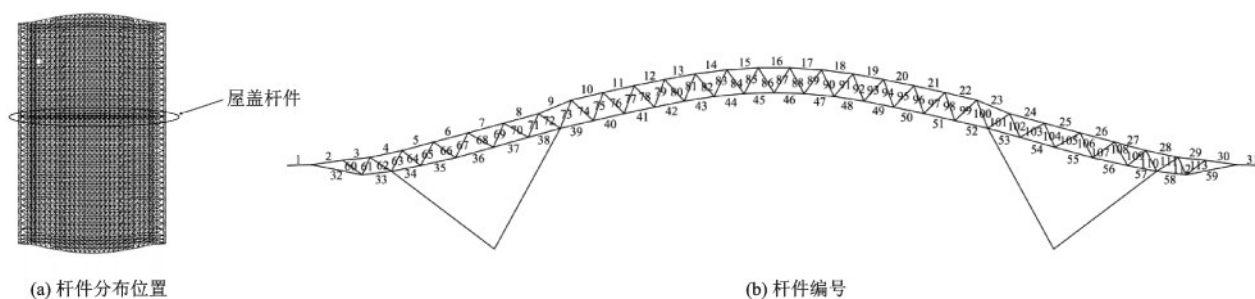


图 6 大跨空间网架枢纽结构屋盖杆件示意

Fig.6 Schematic diagram of roof members of large-span spatial grid hub structure

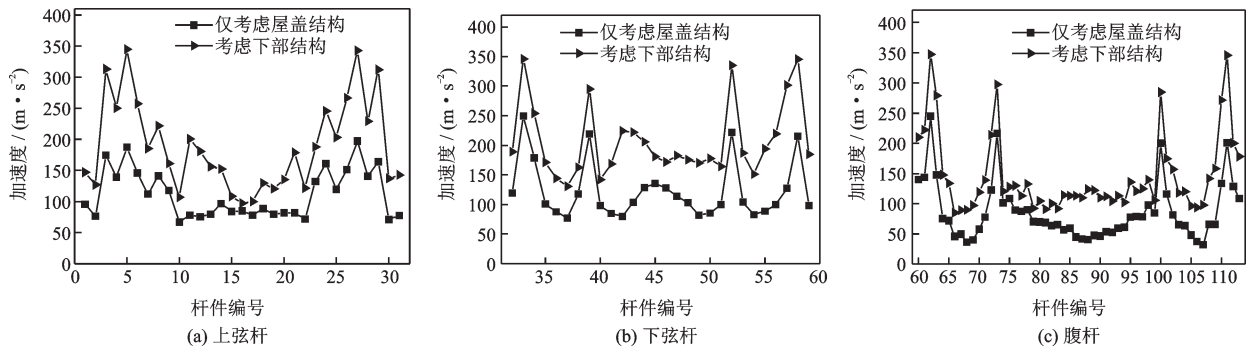


图7 310 gal Ferndale波作用下屋盖杆件应力时程峰值图

Fig.7 Peak stress history of roof members under 310gal Ferndale wave

根据网架枢纽结构屋盖杆件应力分布规律,选取上弦杆3、5、27、29,下弦杆33、39、52、58,腹杆62、73、100和111号杆件作为关键杆件,将所选杆件在地震加速度峰值分别为150 gal和310 gal的Ferndale波、El Centro波和人工波1作用下的应力时程响应峰值列于表7,工况1代表仅考虑屋盖结构,工况2代表考虑下部结构。

由表7可以看出,在不同地震波和不同地震加速度峰值作用下,网架枢纽结构屋盖杆件应力峰值系数 $\alpha$ 均大于零,约为12.1%~125.1%,表明考虑下部结构会增大网架枢纽结构屋盖杆件的应力。这是由于相比仅考虑屋盖结构,考虑下部结构会放大屋盖的地震响应,因此考虑下部结构时网架枢纽结构屋盖杆件应力较仅考虑屋盖结构时明显增大。

### 2.3 考虑下部结构对管桁架枢纽结构地震响应影响分析

#### 2.3.1 屋盖节点加速度响应分析

为分析考虑下部结构对管桁架枢纽结构加速度响应的的影响,选取具有代表性的屋盖跨中节点,其位置如图8所示。

图9为仅考虑屋盖结构和考虑下部结构时屋盖跨中节点在400 gal的Calexico波作用下的加速度时程曲线,限于篇幅,LA-Baldwin波和人工波2作用下的加速度时程曲线不再给出。由图9可以看出,在Calexico波作用下,考虑下部结构的管桁架枢纽结构屋盖跨中节点X、Y、Z三向加速度响应相比仅考虑屋盖结构时均明显增大。

此外,将在地震加速度峰值分别为200 gal和400 gal的Calexico波、LA-Baldwin波和人工波2作用下得到的屋盖跨中节点的加速度时程响应峰值列于表8,工况1代表仅考虑屋盖结构,工况2代表

考虑下部结构。

从表8可以看出,在不同地震波和不同地震加速度峰值作用下,管桁架枢纽结构屋盖跨中节点的加速度峰值系数 $\alpha$ 均大于零,X向加速度峰值系数 $\alpha$ 约为61.0%~120.5%,Y向加速度峰值系数 $\alpha$ 约为15.8%~73.8%,Z向加速度峰值系数 $\alpha$ 约为142.4%~248.6%,这表明考虑下部结构会较大程度地增大管桁架枢纽结构的加速度响应。这是由于管桁架枢纽结构上部屋盖的质量和刚度相对下部结构较小,在地震作用下由结构底部传至屋盖的地震动被放大,使屋盖的地震加速度响应相比仅考虑屋盖结构时得到了较大程度的增大。此外,相比X向和Y向的加速度响应,考虑下部结构的管桁架枢纽结构屋盖跨中节点的Z向加速度响应增大更加显著,这是由于屋盖跨中节点位于屋脊拱起的顶点处,对地震作用下的竖向响应变化更加敏感。

#### 2.3.2 屋盖节点位移响应分析

同样选取屋盖跨中节点作为研究对象,通过分析不同地震作用下屋盖跨中节点的相对位移(相对于屋盖支承柱柱顶节点)研究考虑下部结构对管桁架枢纽结构屋盖变形的影响。

在地震加速度峰值分别为200 gal和400 gal的Calexico波、LA-Baldwin波和人工波2作用下,得到屋盖跨中节点的相对位移时程响应峰值并列于表9,工况1代表仅考虑屋盖结构,工况2代表考虑下部结构。图10为仅考虑屋盖结构和考虑下部结构时屋盖跨中节点在400 gal的Calexico波作用下的相对位移时程曲线,限于篇幅,LA-Baldwin波和人工波2作用下的相对位移时程曲线不再给出。

由图10可以看出,在Calexico波作用下,考虑下部结构的管桁架枢纽结构屋盖跨中节点X、Y、Z三向相对位移响应相比仅考虑屋盖结构时均不同

表7 大跨空间网架枢纽结构屋盖杆件应力响应峰值

Table 7 Peak stress response of roof members of large-span spatial pipe hub structure

单位:MPa

|     |             | 150 gal  |           |       | 310 gal  |           |       |
|-----|-------------|----------|-----------|-------|----------|-----------|-------|
|     |             | Ferndale | El Centro | 人工波 1 | Ferndale | El Centro | 人工波 1 |
| 3   | 工况 1        | 113.0    | 90.4      | 106.0 | 174.7    | 153.2     | 157.5 |
|     | 工况 2        | 140.6    | 133.5     | 236.5 | 313.5    | 251.4     | 341.9 |
|     | $\alpha/\%$ | 24.5     | 47.7      | 123.1 | 79.4     | 64.1      | 117.1 |
| 5   | 工况 1        | 127.9    | 113.1     | 129.3 | 187.1    | 164.0     | 198.7 |
|     | 工况 2        | 174.0    | 157.2     | 275.2 | 345.2    | 305.0     | 349.8 |
|     | $\alpha/\%$ | 36.1     | 38.9      | 112.8 | 84.5     | 86.0      | 76.1  |
| 27  | 工况 1        | 120.6    | 122.2     | 173.6 | 197.1    | 171.4     | 281.3 |
|     | 工况 2        | 182.7    | 193.4     | 245.8 | 342.6    | 333.7     | 347.1 |
|     | $\alpha/\%$ | 51.6     | 58.2      | 41.6  | 73.8     | 94.7      | 23.4  |
| 29  | 工况 1        | 96.0     | 98.9      | 137.5 | 164.0    | 140.5     | 226.6 |
|     | 工况 2        | 145.0    | 155.1     | 205.5 | 312.3    | 295.4     | 338.0 |
|     | $\alpha/\%$ | 51.0     | 56.7      | 49.4  | 90.4     | 110.2     | 49.1  |
| 33  | 工况 1        | 164.4    | 148.6     | 153.4 | 249.3    | 210.1     | 215.1 |
|     | 工况 2        | 213.4    | 199.5     | 345.3 | 346.2    | 345.0     | 347.4 |
|     | $\alpha/\%$ | 29.8     | 34.3      | 125.1 | 38.9     | 64.2      | 61.5  |
| 39  | 工况 1        | 170.7    | 170.1     | 188.1 | 219.2    | 224.6     | 253.1 |
|     | 工况 2        | 191.4    | 211.6     | 263.0 | 294.8    | 335.5     | 335.3 |
|     | $\alpha/\%$ | 12.1     | 24.4      | 39.9  | 34.5     | 49.4      | 32.5  |
| 52  | 工况 1        | 171.8    | 166.8     | 195.1 | 222.1    | 224.8     | 282.6 |
|     | 工况 2        | 217.8    | 220.2     | 249.9 | 335.1    | 335.5     | 336.6 |
|     | $\alpha/\%$ | 26.8     | 32.0      | 28.1  | 50.9     | 49.2      | 19.1  |
| 58  | 工况 1        | 139.2    | 143.9     | 195.7 | 215.5    | 210.6     | 306.6 |
|     | 工况 2        | 239.7    | 221.9     | 279.2 | 345.5    | 345.4     | 345.9 |
|     | $\alpha/\%$ | 72.2     | 54.3      | 42.7  | 60.3     | 64.0      | 12.8  |
| 62  | 工况 1        | 161.5    | 175.2     | 177.4 | 244.9    | 236.7     | 249.7 |
|     | 工况 2        | 209.1    | 231.0     | 345.4 | 346.8    | 345.3     | 347.8 |
|     | $\alpha/\%$ | 29.5     | 31.8      | 94.8  | 41.6     | 45.9      | 39.3  |
| 73  | 工况 1        | 141.5    | 146.4     | 160.2 | 216.1    | 227.9     | 219.7 |
|     | 工况 2        | 192.1    | 219.2     | 226.4 | 297.1    | 335.3     | 335.3 |
|     | $\alpha/\%$ | 35.8     | 49.7      | 41.4  | 37.5     | 47.1      | 52.7  |
| 100 | 工况 1        | 140.5    | 152.1     | 164.7 | 199.9    | 216.6     | 239.7 |
|     | 工况 2        | 200.7    | 215.3     | 248.1 | 284.4    | 335.9     | 335.1 |
|     | $\alpha/\%$ | 42.8     | 41.6      | 50.6  | 42.3     | 55.1      | 39.8  |
| 111 | 工况 1        | 132.7    | 143.4     | 170.5 | 200.7    | 228.0     | 268.3 |
|     | 工况 2        | 235.2    | 208.9     | 278.0 | 345.5    | 336.6     | 345.4 |
|     | $\alpha/\%$ | 77.2     | 45.6      | 63.0  | 72.1     | 47.6      | 28.7  |

程度地增大。结合表9,在不同地震波和不同地震加速度峰值作用下,管桁架枢纽结构屋盖跨中节点的相对位移峰值系数 $\alpha$ 均大于零,这是由于相比仅考虑屋盖结构,考虑下部结构会放大屋盖的地震响

应,此外考虑下部结构时屋盖支承柱柱底约束减弱,使结构变柔,也会增大屋盖的变形。此外由图10可以看出,在Calexico波作用下,考虑下部结构对管桁架枢纽结构屋盖跨中节点的X向相对位移响应

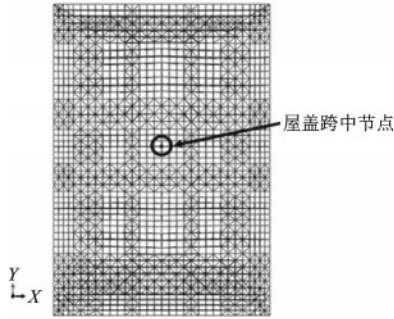


图8 大跨空间管桁架枢纽结构屋盖跨中节点示意图  
Fig.8 Schematic diagram of mid span node on roof of large-span spatial pipe truss hub structure

影响较小,对Y向和Z向相对位移响应影响显著。结合表9可以看出,管桁架枢纽结构屋盖跨中节点的X向相对位移峰值系数 $\alpha$ 约为3.8%~73.3%,Y向相对位移峰值系数 $\alpha$ 约为50.0%~155.0%,Z向相对位移峰值系数 $\alpha$ 约为144.9%~453.1%,这是由于管桁架枢纽结构屋盖X向刚度较大,因此节点X向相对位移变化较小。从表9也可以看出,在地震

作用下,屋盖跨中节点的X向相对位移远小于Y向和Z向相对位移,这也表明屋盖X向刚度较大。此外和节点加速度响应的变化规律相同,相比X向和Y向的相对位移响应,节点Z向的相对位移响应增加显著。

### 2.3.3 屋盖杆件应力响应分析

为充分分析考虑下部结构对管桁架枢纽结构屋盖杆件应力响应的影响,选取屋盖中央一榀桁架如图11所示。管桁架枢纽结构屋盖具有对称性,因此选取桁架的一半,将杆件分为上弦杆、腹杆和下弦杆三类并进行编号。图12为所选杆件在400 gal的Calexico波作用下的应力时程峰值图,限于篇幅,LA-Baldwin波和人工波2作用下的杆件应力时程峰值图不再给出。

由图12可以看出,管桁架结构在地震作用下的杆件应力分布具有以下规律:无论是上弦杆、腹杆还是下弦杆,杆件应力均在屋盖柱支承处最大,除此之外,对于上弦杆和下弦杆,杆件应力分布较均匀,其中在屋盖1/4跨度处较大,对于斜腹杆,1/4跨

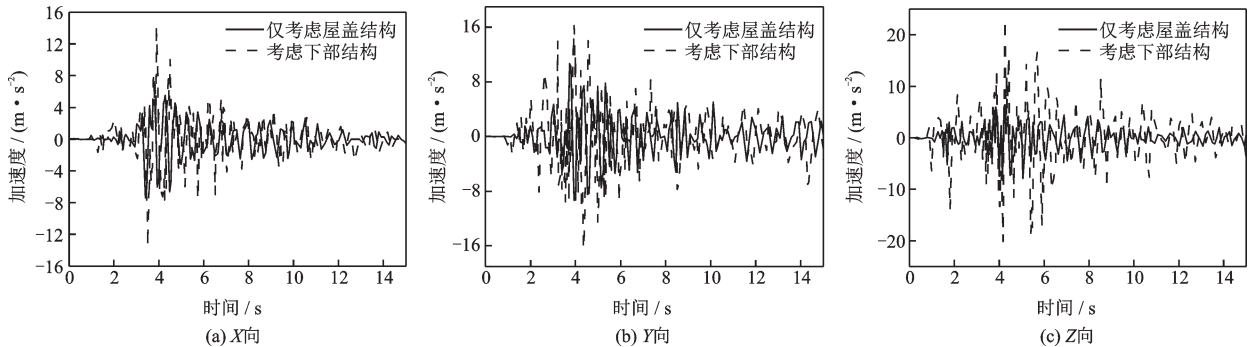


图9 400 gal Calexico波作用下屋盖跨中节点加速度时程曲线  
Fig.9 Acceleration time history curve of roof mid span node under 400 gal calexco wave

表8 大跨空间管桁架枢纽结构屋盖跨中节点加速度响应峰值

Table 8 Peak acceleration response of the node in the roof span of the large-span spatial pipe truss hub structure

|    |             | 200 gal  |           |       | 400 gal  |           |       |
|----|-------------|----------|-----------|-------|----------|-----------|-------|
|    |             | Calexico | LA-Baldin | 人工波 2 | Calexico | LA-Baldin | 人工波 2 |
| X向 | 工况 1        | 3.2      | 3.8       | 4.3   | 7.4      | 8.5       | 9.9   |
|    | 工况 2        | 7.0      | 6.1       | 9.1   | 14.5     | 14.4      | 21.8  |
|    | $\alpha/\%$ | 116.4    | 61.0      | 113.6 | 96.4     | 70.0      | 120.5 |
| Y向 | 工况 1        | 6.7      | 8.9       | 10.7  | 10.7     | 17.6      | 17.2  |
|    | 工况 2        | 11.5     | 15.0      | 16.9  | 16.5     | 20.4      | 29.9  |
|    | $\alpha/\%$ | 72.5     | 69.0      | 57.6  | 53.9     | 15.8      | 73.8  |
| Z向 | 工况 1        | 4.4      | 5.2       | 5.6   | 8.2      | 12.0      | 12.1  |
|    | 工况 2        | 13.7     | 13.8      | 19.4  | 23.0     | 29.0      | 33.8  |
|    | $\alpha/\%$ | 210.5    | 164.6     | 248.6 | 179.3    | 142.4     | 179.7 |

表9 大跨空间管桁架枢纽结构屋盖跨中节点相对位移响应峰值

Table 9 Peak value of relative displacement response of mid span joints in roof of large-span spatial pipe truss hub structure

单位: mm

|    |             | 200 gal  |           |       | 400 gal  |           |       |
|----|-------------|----------|-----------|-------|----------|-----------|-------|
|    |             | Calexico | LA-Baldin | 人工波 2 | Calexico | LA-Baldin | 人工波 2 |
| X向 | 工况 1        | 2.3      | 2.3       | 2.5   | 5.0      | 4.5       | 5.8   |
|    | 工况 2        | 2.5      | 3.4       | 4.0   | 5.2      | 5.3       | 10.1  |
|    | $\alpha/\%$ | 9.7      | 48.7      | 64.2  | 3.8      | 17.4      | 73.3  |
| Y向 | 工况 1        | 38.3     | 50.2      | 59.5  | 69.6     | 103.1     | 105.8 |
|    | 工况 2        | 72.5     | 128.0     | 116.1 | 104.4    | 168.9     | 162.5 |
|    | $\alpha/\%$ | 89.1     | 155.0     | 95.2  | 50.0     | 63.9      | 53.5  |
| Z向 | 工况 1        | 11.3     | 25.7      | 21.7  | 22.0     | 52.7      | 44.2  |
|    | 工况 2        | 62.2     | 62.9      | 94.4  | 104.1    | 197.6     | 244.2 |
|    | $\alpha/\%$ | 450.1    | 144.9     | 334.6 | 372.7    | 274.6     | 453.1 |

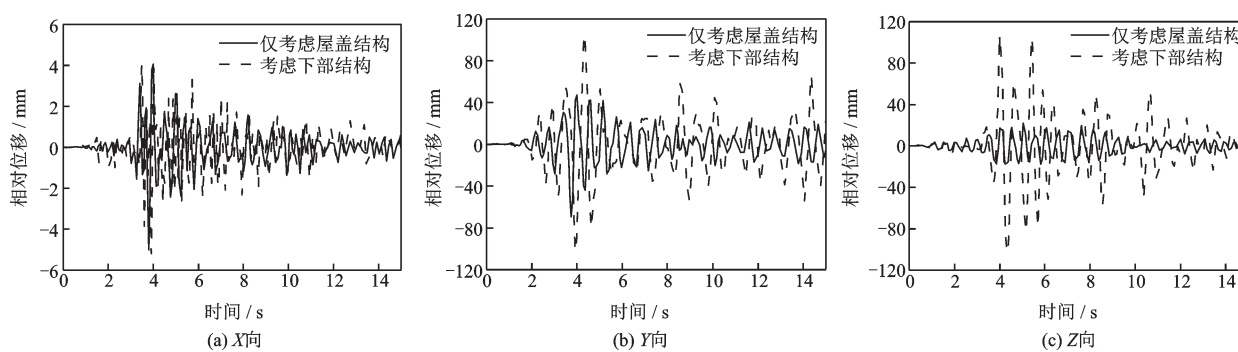


图10 400 gal Calexico波作用下屋盖跨中节点相对位移时程曲线

Fig.10 Relative displacement time history curve of roof mid span node under 400 gal calexco wave

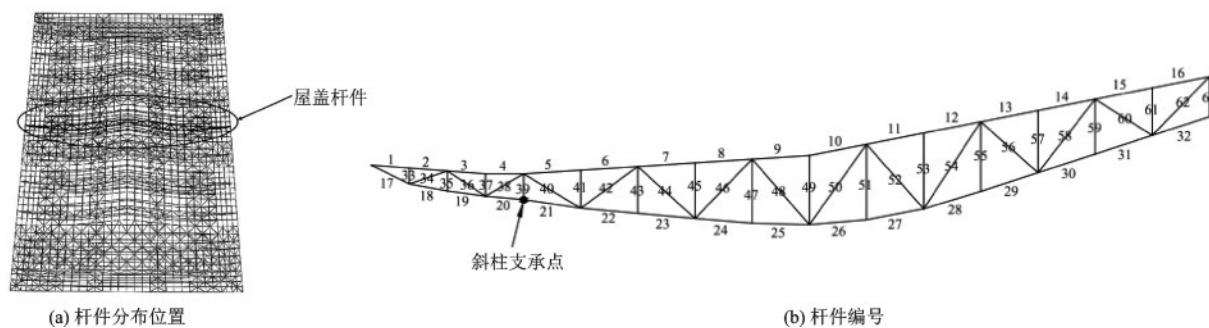


图11 大跨空间管桁架枢纽结构屋盖杆件示意

Fig.11 Schematic diagram of roof members of large-span spatial pipe truss hub structure

度处杆件应力最大,向两边逐渐减小,而竖腹杆应力较小且分布均匀。此外可以看出,仅考虑屋盖结构和考虑下部结构时管桁架枢纽结构屋盖的杆件应力分布规律没有发生变化,但相比仅考虑屋盖结构,考虑下部结构时管桁架枢纽结构屋盖杆件应力均不同程度地增大。

根据管桁架枢纽结构屋盖杆件应力分布规律,选取上弦杆 3、4,下弦杆 19、20 和腹杆 39 号杆件作

为关键杆件,将所选杆件在地震加速度峰值分别为 200 gal 和 400 gal 的 Calexico 波、LA-Baldwin 波和人工波 2 作用下的应力时程响应峰值列于表 10,工况 1 代表仅考虑屋盖结构,工况 2 代表考虑下部结构。

由表 10 可以看出,在不同地震波和不同地震加速度峰值作用下,管桁架枢纽结构屋盖杆件应力峰值系数  $\alpha$  均大于零,约为 0.1%~119.2%,表明考虑下部结构会增大管桁架枢纽结构屋盖杆件的应力。

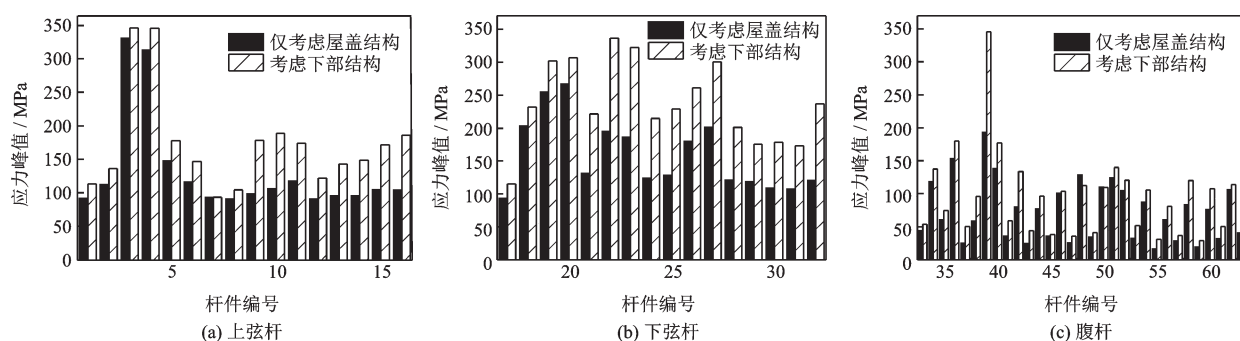


图 12 400 gal Calexico 波作用下屋盖主桁架杆件应力时程峰值

Fig.12 Peak stress time history of main truss members of roof under 400 gal Calexico wave

表 10 大跨空间管桁架枢纽结构屋盖杆件应力响应峰值

Table 10 Peak stress response of roof members of large-span spatial pipe truss hub structure

单位:MPa

|    |             | 200 gal  |           |       | 400 gal  |           |       |
|----|-------------|----------|-----------|-------|----------|-----------|-------|
|    |             | Calexico | LA-Baldin | 人工波 2 | Calexico | LA-Baldin | 人工波 2 |
| 3  | 工况 1        | 188.5    | 188.1     | 240.7 | 330.2    | 298.5     | 345.0 |
|    | 工况 2        | 320.4    | 326.1     | 323.8 | 345.5    | 345.0     | 345.5 |
|    | $\alpha/\%$ | 70.0     | 73.4      | 34.5  | 4.6      | 15.6      | 0.1   |
| 4  | 工况 1        | 177.8    | 175.3     | 224.0 | 312.8    | 286.3     | 344.3 |
|    | 工况 2        | 299.8    | 307.0     | 307.6 | 345.2    | 337.7     | 345.1 |
|    | $\alpha/\%$ | 68.7     | 75.1      | 37.3  | 10.4     | 18.0      | 0.2   |
| 19 | 工况 1        | 142.1    | 140.5     | 181.5 | 254.8    | 225.9     | 296.0 |
|    | 工况 2        | 233.0    | 243.9     | 255.5 | 301.6    | 270.9     | 298.1 |
|    | $\alpha/\%$ | 63.9     | 73.6      | 40.8  | 18.4     | 19.9      | 0.7   |
| 20 | 工况 1        | 155.2    | 155.0     | 193.0 | 266.8    | 239.8     | 311.4 |
|    | 工况 2        | 274.2    | 264.4     | 270.2 | 306.8    | 310.4     | 333.0 |
|    | $\alpha/\%$ | 76.6     | 70.5      | 40.0  | 15.0     | 29.4      | 6.9   |
| 39 | 工况 1        | 101.3    | 122.9     | 122.0 | 193.1    | 227.9     | 202.4 |
|    | 工况 2        | 222.0    | 190.7     | 193.6 | 345.5    | 308.1     | 345.9 |
|    | $\alpha/\%$ | 119.2    | 55.2      | 58.6  | 78.9     | 35.2      | 70.9  |

这是由于相比仅考虑屋盖结构,考虑下部结构会放大屋盖的地震响应。此外还可以看出,随地震加速度峰值的增大,杆件应力系数 $\alpha$ 减小,这是由于考虑下部结构时当地震加速度峰值增大,应力较大的杆件在内力重分布的影响下杆件应力的增加相比仅考虑屋盖结构时小,因此杆件应力系数 $\alpha$ 减小。

#### 2.4 考虑下部结构对大跨空间枢纽结构地震响应影响机理分析

从前面的研究可以发现,相比仅考虑屋盖结构,考虑下部结构的网架枢纽结构和管桁架枢纽结构屋盖地震响应均有较大程度的增大,为进一步研究下部结构对大跨空间枢纽结构地震响应的影响机理,对结构柱节点的加速度响应沿楼层的变化规

律进行分析。图 13 和图 14 分别为网架枢纽结构和管桁架枢纽结构在不同地震波作用下柱节点加速度放大系数沿楼层的变化曲线。

由图 13 和图 14 可以看出,大跨空间枢纽结构柱节点加速度响应沿楼层高度增大,且相比下部结构节点的加速度响应,屋盖处的节点响应显著增大,这是由于大跨空间枢纽结构与普通结构形式不同,上部屋盖与下部框架结构相比刚度较小,在地震作用下结构底部的地震动在向上传递的过程中被放大,这与高层建筑结构中的鞭梢效应同理。

此外,采用白噪声激励计算各楼层柱节点相对于底部节点的加速度传递率函数,白噪声激励频率范围为 0~50 Hz,长度为 60 s,时间步长为 0.005 s,加速度时程曲线如图 15 所示。图 16 和图 17 分别为

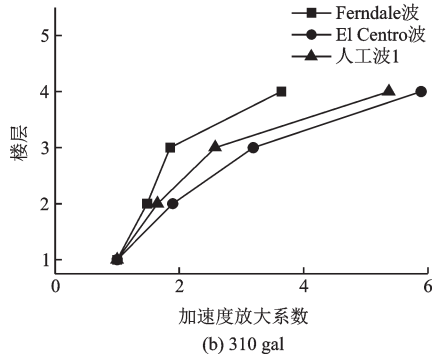
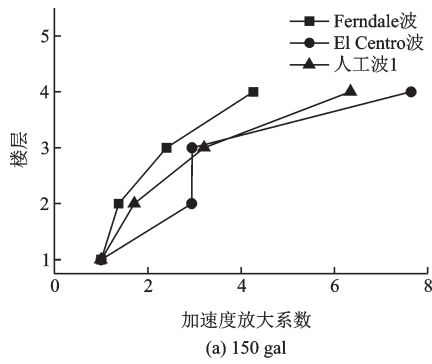


图13 网架枢纽结构节点加速度放大系数变化曲线  
Fig.13 Variation curve of node acceleration amplification factor of grid hub structure

网架枢纽结构和管桁架枢纽结构各楼层柱节点加速度传递函数的幅频特性曲线。

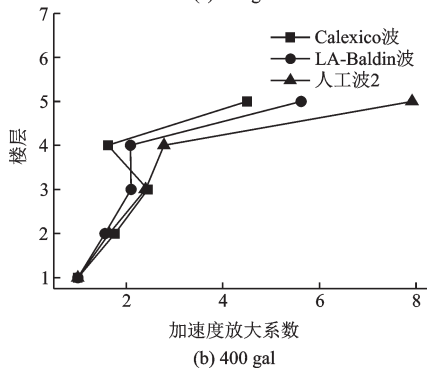
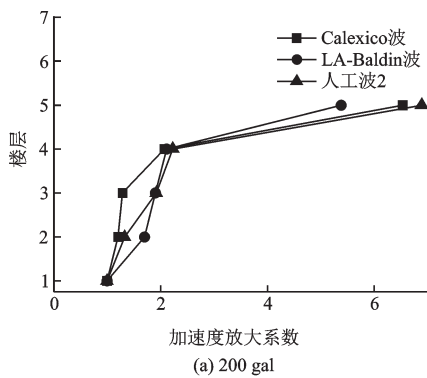


图14 管桁架枢纽结构节点加速度放大系数变化曲线  
Fig.14 Variation curve of node acceleration amplification factor of pipe truss hub structure

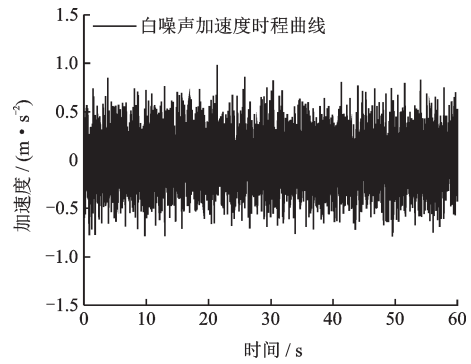


图15 白噪声加速度时程曲线  
Fig.15 Acceleration time history curve of white noise

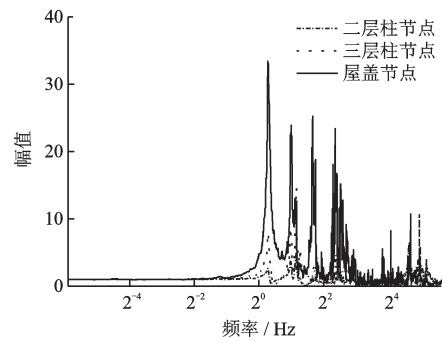


图16 网架枢纽结构各楼层节点加速度传递率函数曲线  
Fig.16 Acceleration transfer rate function curve of each floor node of grid hub structure

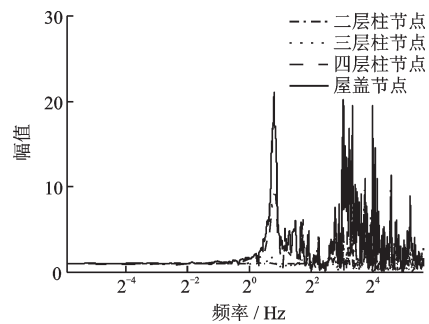


图17 管桁架枢纽结构各楼层节点加速度传递率函数曲线  
Fig.17 Acceleration transfer rate function curve of each floor node of pipe truss hub structure

由图16和图17可以看出,在不同频率的激励作用下屋盖节点的传递率函数幅值均大于下部结构各层柱节点,这同样表明考虑下部结构会放大大跨空间枢纽结构屋盖节点的响应,且在结构的共振频率处屋盖节点的传递率函数幅值远大于下部结构各层柱节点。

### 3 结论

分别对仅考虑屋盖结构和考虑下部结构的大

跨空间网架枢纽结构及管桁架枢纽结构进行动力特性分析及动力时程分析,通过对结构自振频率、地震作用下屋盖节点的加速度响应、位移响应以及关键杆件的应力响应分析,得到以下主要结论:

(1)考虑下部结构的大跨空间枢纽结构自振频率相比仅考虑屋盖结构时明显降低,结构前十阶自振频率最大相差20.2%。

(2)由于大跨空间枢纽结构上下部刚度的差异,在鞭梢效应的影响下考虑下部结构会使大跨空间枢纽结构屋盖的动力响应明显增大。对于网架枢纽结构,相比仅考虑屋盖结构时,屋盖节点的加速度响应增大约51.4%~171.1%,节点位移响应增大约52.0%~227.3%,杆件应力增大约12.1%~125.1%;对于管桁架枢纽结构,屋盖节点的加速度响应增大约15.8%~248.6%,节点位移响应增大约3.8%~453.1%,杆件应力增大约0.1%~119.2%。因此在设计时有必要对大跨空间枢纽结构进行整体结构计算分析。

(3)对于大跨空间枢纽结构,考虑下部结构时屋盖杆件的应力分布规律相比仅考虑屋盖结构时没有发生变化,杆件应力均在柱支承处最大,因此在设计时应重点关注柱支承处的杆件。此外,随地震加速度峰值的增大,进入弹塑性的屋盖杆件的应力增大系数相比弹性工作阶段减小。

## 参考文献:

[1] 王秀丽,王磊.边界支承对复杂网壳性能的影响[C]//庆祝刘锡良教授八十华诞暨第八届全国现代结构工程学术研讨会论文集.天津:全国现代结构工程学术研讨会学术委员会,2008:711-715.  
Wang X L, Wang L. Influence of boundary support on the performance of complex reticulated shells[C]//Celebrating Professor Liu Xiliang's 80th Birthday and Proceedings of the 8th National Symposium on Modern Structural Engineering. Tianjin: Academic Committee of National Symposium on Modern Structural Engineering, 2008: 711-715. (in Chinese)

[2] 柳春光,李会军,林桂枫.不同支座约束下网架结构的动力特性对比[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2009,28(5):746-749.  
Liu Ch G, Li H J, Lin G F. Comparative study on dynamic performance of latticed truss with different bearings [J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2009, 28(5): 746-749. (in Chinese)

[3] 孙梦涵,范峰,支旭东,等.考虑下部柱支承四角锥网架结构动力响应分析[J].土木工程学报,2014,47(12):9-15.  
Sun M H, Fan F, Zhi X D, et al. Analysis on dynamic response of quadrangular pyramid grid structure with supporting columns [J]. China Civil Engineering Journal, 2014, 47(12): 9-15. (in Chinese)

[4] 王和朋,徐忠根,陈荣毅.下部框架结构的协同工作对张弦桁架抗震性能的影响[J].空间结构,2014,20(2):37-45.  
Wang H P, Xu Zh G, Chen R Y. Effect of seismic response of truss string structure with cooperative work of the base frame structure [J]. Spatial Structure, 2014, 20(2): 37-45. (in Chinese)

[5] 陈经纬,施刚,陈宏.大跨空间桁架与混凝土支承结构体系协同工作分析[J].四川建筑科学研究,2016,42(1):6-10.  
Chen J W, Shi G, Chen H. Analysis of cooperative effect of largespan space truss with supporting concrete structure [J]. Sichuan Building Science, 2016, 42(1): 6-10. (in Chinese)

[6] 齐卫东,张华刚,方强,等.混凝土人字形密肋网壳与下部结构共同工作性能分析[J].空间结构,2017,23(4):36-44.  
Qi W D, Zhang H G, Fang Q, et al. Interaction performance analysis between concrete herring-bone multi-ribbed shell and its substructure [J]. Spatial Structures, 2017, 23(4): 36-44. (in Chinese)

[7] 刘金波,梁志勇.考虑下部结构的双向张弦梁竖向地震响应分析[J].河北工业科技,2017,34(6):448-452.  
Liu J B, Liang Zh Y. Vertical seismic response analysis of bi-directional beam string structure considering supporting frame [J]. Hebei Journal of Industrial Science and Technology, 2017, 34(6): 448-452. (in Chinese)

[8] 丁洁民,康晓菊.北京奥运会乒乓球馆钢屋盖与下部结构的协同工作[J].建筑结构,2006,36(增1):227-230.  
Ding J M, Kang X J. Cooperative effect between the steel roof structure and supporting structure of Beijing Olympic Ping-pong Gymnasium [J]. Building Structure, 2006, 36(Sup 1): 227-230. (in Chinese)

[9] 吴勇军,甄庆华.钢网架屋盖和混凝土支承框架的整体性分析[J].建筑结构,2007,37(9):70-73.  
Wu Y J, Zhen Q H. Integral analysis of steel space grid roof and RC sub-frame [J]. Building Structure, 2007, 37(9): 70-73. (in Chinese)

[10] 王秀丽,王磊,薛素铎.大跨复杂屋面组合结构协同工作动力性能研究[J].北京工业大学学报,2010,36

- (9):1215-1221.
- Wang X L, Wang L, Xue S D. Research on dynamic performance of large-span complex spatial structure with overall working behavior [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2010,36(9):1215-1221. (in Chinese)
- [11] 陈丹, 杨维国, 赵雅, 等. 海原博物馆上下部结构协同工作性能研究[J]. 建筑结构, 2011,41(3):50-54.  
Chen D, Yang W G, Zhao Y, et al. Research on the coincident work between upper steel structure and lower-concrete structure of Haiyuan Museum [J]. Building Structure, 2011,41(3):50-54.(in Chinese)
- [12] 刘明, 董城, 史月珍, 等. 天津西站站房主体结构设计 [C]//2011 中国铁路客站技术交流会论文集. 成都: 铁道部工程设计鉴定中心; 中国交通运输协会, 2011: 327-336.  
Liu M, Dong Ch, Shi Y Zh, et al. Main structure design of Tianjin West Railway Station[C]//Proceedings of 2011 China Railway Station Technology Exchange Conference. Chengdu: Engineering Design Appraisal Center of the Ministry of Railways; China Transportation Association, 2011:327-336.(in Chinese)
- [13] 李志东, 李伟政, 袁立朴, 等. 京沪高铁南京南站站房结构设计研究[J]. 建筑结构, 2013,43(17):21-32.  
Li Zh D, Li W Zh, Yuan L P, et al. Structural design of Nanjing South Railway Station for Beijing-Shanghai express railway [J]. Building Structure, 2013, 43(17): 21-32. (in Chinese)
- [14] 金平, 白海, 郭剑, 等. 济南西站大跨度钢屋盖施工技术 [C]//大型复杂钢结构建筑工程施工新技术与应用论文集. 绍兴: 中国建筑金属结构协会, 2012:140-145.  
Jin P, Bai H, Guo J, et al. Construction technology of large span steel roof of Jinan West Railway Station [C]//New Technology and Application of Large Complex Steel Structure Construction. Shaoxing: China Building Metal Structure Association, 2012: 140-145. (in Chinese)
- [15] 甄伟, 盛平, 柯长华, 等. 广州新客站主站房屋盖钢结构设计[J]. 建筑结构, 2009,39(12):11-16.  
Zhen W, Sheng P, Ke Ch H, et al. Steel structural design on the roof of New Guangzhou Railway Station [J]. Building Structure, 2009,39(12):11-16. (in Chinese)
- [16] 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 P, Li Y M, Lai M. Selection of control index for input seismic wave of structural time history analysis method[J]. China Civil Engineering Journal, 2000, 33(6):33-37. (in Chinese)
- [17] 建筑抗震设计规范:GB 50011—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.  
Code for seismic design of buildings: GB 50011—2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2016. (in Chinese)
- (本文责编:周小潭)



(上接第 822 页)

- [10] 黄晓露, 谢元一, 荣建忠, 等. 木垛火热释放速率的试验研究[J]. 消防科学与技术, 2014,33(5):484-486.  
Huang X L, Xie Y Y, Rong J Zh, et al. Experimental study of heat release rate of wood crib[J]. Fire Science and Technology, 2014,33(5):484-486. (in Chinese)
- [11] BS EN 1991-1-2: 2002, Eurocode 1: action on structures-part 1-2: general action-actions on structures exposed to fire [S]. Brussels: European Committee for Standardization, 2002.
- [12] Kevin M G, Simo H, Randall M D, et al. Fire dynamics simulator (sixth edition) user's guide[M]. Washington: U.S. Government Printing Office, 2017.
- [13] 张庆文, 张和平, 万玉田, 等. 4 mm 单层浮法玻璃全尺寸火灾实验研究[J]. 燃烧科学与技术, 2007, 13(1): 67-71.  
Zhang Q W, Zhang H P, Wang Y T, et al. Experimental study of 4 mm thick float glass in full-scale enclosure fire test [J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2007,13(1):67-71. (in Chinese)
- [14] 张志猛. 钢结构火灾损伤识别及安全性鉴定研究[D]. 西安: 西安工业大学, 2016.  
Zhang Zh M. Damage identification and safety authentication research for steel structure after fire [D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2016. (in Chinese)
- [15] Quintiere J G, Steckler K, Corley D. An assessment of fire induced flows in compartments[J]. Fire Science and Technology, 1984,4(1):1-14.
- [16] Morgan J H, Daniel G, John R H, et al. SFPE handbook of fire protection engineering (Fifth Edition) [M]. New York: Springer, 2016.